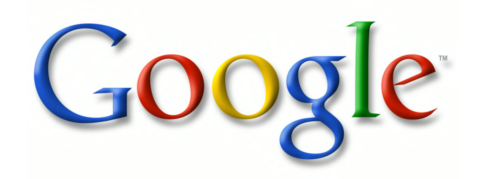



VE
RI
TAS



RÉPERTOIRE

D'OPTIQUE MODERNE

OU

ANALYSE COMPLÈTE DES TRAVAUX MODERNES RELATIFS
AUX PHÉNOMÈNES DE LA LUMIÈRE;

PAR

François Napoléon Marie

M. L'ABBÉ MOIGNO,

Auteur des Leçons de calcul différentiel et intégral, Membre de
l'Académie de Nancy, de la Société orientale, etc., etc.

Première Partie.

PARIS,

A. FRANCK, RUE RICHELIEU, 69;

LEIPSIG,

MÊME MAISON.

1847

RÉPERTOIRE

D'OPTIQUE MODERNE

OU

ANALYSE COMPLÈTE DES TRAVAUX MODERNES RELATIFS
AUX PHÉNOMÈNES DE LA LUMIÈRE ;

PAR

François Napoléon Marie

M. L'ABBÉ MOIGNO,

Auteur des Leçons de calcul différentiel et intégral, Membre de
l'Académie de Nancy, de la Société orientale, etc., etc.

Première Partie.

PARIS,

A. FRANCK, RUE RICHELIEU, 69;

LEIPSIG,

MÊME MAISON.

1842

PRÉFACE.

Cet ouvrage est commencé depuis trop longtemps; la première section fut ébauchée d'abord dans le journal l'*Institut*, excellent recueil qui a obtenu un succès mérité. Notre pensée a été plus tard mieux développée dans la *Revue scientifique* du docteur Quesneville. C'est même aux encouragements flatteurs dont nos articles furent l'objet qu'est due la publication de ces volumes. Un grand nombre d'hommes honorables nous ont pressé de réunir en corps d'ouvrage une série de dissertations qu'ils avaient jugées pleines d'intérêt: nous avons cédé à une si douce invitation.

La partie la plus importante de ce livre est l'explication raisonnée des phénomènes de l'optique moderne dans les deux systèmes de l'émission et des ondulations, et la comparaison délicate de deux théories qui, naguère encore, divisaient le monde savant. L'illustre secrétaire de l'Académie des sciences, l'homme sans contredit le plus compé-

tent dans ces belles matières, M. Arago, a depuis longtemps annoncé qu'il s'occupait activement et de cette explication et de cette comparaison difficiles : n'est-ce pas une témérité pour nous que d'avoir osé le devancer ? Mais la forêt était vierge encore, et M. Arago nous pardonnera d'avoir frayé le sentier obscur qui, sous sa main toute-puissante, deviendra, nous n'en doutons point, une voie large et inondée d'une lumière tellement éclatante qu'elle frappera les yeux les plus volontairement fermés.

Depuis la publication incomplète que ces feuilles ont reçue dans la *Revue scientifique*, un autre académicien non moins célèbre, M. Biot, a écrit sur le même sujet, dans le *Journal des savants*, de belles et séduisantes pages, dont les tendances sont bien différentes des nôtres. Le mouvement ondulatoire des molécules de l'éther n'est pas pour nous une hypothèse, mais une réalité : l'explication des phénomènes de la lumière par les ondulations éthérées n'est plus à nos yeux un système, mais une théorie pleinement confirmée par l'ensemble et le détail des faits ; M. Biot doute encore, et il enveloppe habilement d'un nuage d'incertitudes les grandes et fécondes conceptions de Fresnel, en regrettant toutefois que Fresnel n'ait pas assez vécu pour achever son œuvre. Heureusement que ce nuage est une vapeur légère que l'ombre de l'immortel physicien suffit à dissiper : il nous sera facile de prouver que les hésitations de M. Biot ne sont ni justifiables ni justifiées.

On trouvera aussi dans ces deux volumes l'analyse complète de tous les mémoires relatifs aux phénomènes de la lumière, publiés en France, en Angleterre, en

Allemagne, en Amérique et en Italie. A défaut d'autre mérite, cette analyse, qu'on ne trouverait nulle part ailleurs, fera, nous l'espérons, rechercher cet ouvrage, soit par les savants étrangers, heureux de se voir, enfin, connus et appréciés en France, soit par nos compatriotes auxquels nous offrons un moyen facile d'échapper à un reproche qui n'est pas sans quelque fondement, celui de rester trop en dehors des progrès que la science fait chez les nations rivales.

Depuis que l'impression de ce premier volume est achevée, la science de l'optique a fait de nouveaux pas : MM. Faraday et Wheatstone en Angleterre ; Haidinger et Neef en Allemagne ; Fizeau, Foucault et Soleil en France, ont réalisé d'heureuses découvertes, constaté des propriétés ignorées de la lumière, conçu des expériences nouvelles et ingénieuses, etc., etc. ; notre seconde partie, qui ne tardera pas à paraître, analysera ces divers travaux ; et, redevenu complet, ce répertoire ne laissera, nous l'espérons, rien à désirer, du moins comme expression fidèle et rapide des progrès de la science.

Un mot sur la forme de notre rédaction. Nous avons voulu parler à tout le monde, être compris de tout le monde ; il fallait dès lors s'astreindre à une exposition physique, soutenue seulement et éclairée par des formules élémentaires et faciles ; il fallait renoncer à donner des démonstrations qui ne pouvaient devenir rigoureuses que par l'emploi du calcul intégral. On ne doit donc pas chercher dans ce premier ouvrage une théorie mathématique complète des phénomènes de la lumière : c'est une lacune, nous le savons, mais on ne peut tout entrepren-

dre à la fois, et chaque chose doit avoir son temps. Après avoir répondu aux désirs du plus grand nombre, et si M. Cauchy ne s'est pas décidé ou ne se décide pas à compléter et à publier l'ensemble de sa grande synthèse, nous essaierons une fois encore de le remplacer, en surmontant la répugnance que nous inspirent le sentiment de notre impuissance et la conviction intime que nous ne sommes pas assez à la hauteur de cette difficile mission. Heureusement que notre savant ami M. Von Ettingshausen, de Vienne, l'homme le mieux initié aux travaux de M. Cauchy, nous annonce la prochaine impression de ses Leçons de physique mathématique; il nous ouvre la voie; guidé dans le labyrinthe par sa main habile, nous arriverons mieux au terme.

Ajoutons, enfin, en terminant, que si cette nouvelle tâche n'est pas vraiment au-dessus de nos forces, nous donnerons, à la fin de la seconde partie : 1° la littérature complète de l'optique; 2° le catalogue raisonné et figuré des propositions à démontrer, des expériences qui constituent la démonstration, et des appareils à l'aide desquels se font les expériences. Nous aurions ainsi comblé un grand vide, et satisfait à un immense besoin.

Paris, ce 15 août 1845.

F. MOIGNO.

ADDITIONS ET CORRECTIONS.

Page 84. — Ce n'est pas dans sa *Micrographie*, mais dans les Transactions philosophiques, que Hook a énoncé pour la première fois le principe des vibrations transversales; on trouve aussi cet énoncé dans l'*Histoire de la Société royale*, par Birsch.

Pages 104 *et* 105. — Nous avouons à notre confusion, à la confusion aussi de la plupart des physiciens, que nous avions lu avec trop peu d'attention l'admirable article *Polarisation de la lumière* que M. Arago composa pour l'*Encyclopédie britannique*, et qui n'est encore connu dans le monde savant que par la traduction anglaise qu'en fit le célèbre Young. Plusieurs lois fort importantes relatives à la polarisation complète ou partielle nous avaient ainsi échappé; nous les reproduisons ici avec bonheur :

1° Le sinus de l'angle sous lequel un faisceau de la lumière doit se réfléchir à la première surface d'un corps pour qu'il contienne une certaine proportion de lumière polarisée, est au sinus de l'angle sous lequel la réflexion à la seconde surface communiquerait au même faisceau neutre une polarisation équivalente, comme le sinus d'incidence est au sinus de réfraction.

2° L'expérience démontre aussi la loi photométrique suivante : le sinus de l'angle sous lequel une certaine proportion d'un faisceau naturel est réfléchi à la première surface d'un corps, est au sinus de l'angle sous lequel une proportion égale de ce faisceau serait réfléchie à la seconde surface s'il y arrivait immédiatement, comme le sinus d'incidence est au sinus de réfraction.

3° Cette règle de photométrie, combinée avec le théorème précédent, conduit à cet énoncé très simple. La première et la seconde surface d'un corps polarisent des proportions égales de la lumière incidente dans les angles sous lesquels ces mêmes surfaces la réfléchissent également.

4° La quantité de lumière polarisée contenue dans le faisceau que

transmet une surface diaphane est égale exactement à la quantité de lumière polarisée rectangulairement que renferme le faisceau réfléchi dans le même plan. Il résulte de là que sous l'angle où la réflexion polarise complétement la lumière, les deux images du faisceau transmis données par un cristal convenablement placé différeront d'intensité d'une quantité égale à la totalité du rayon réfléchi; et que si jamais on découvre un corps qui, sous cet angle, réfléchisse la moitié de la lumière incidente, le faisceau transmis sous la même inclinaison sera lui-même complétement polarisé.

5° Un des meilleurs moyens de vérifier l'exactitude des lois physiques est de chercher ce qu'elles deviennent dans les cas extrêmes. La loi précédente conduit, par exemple, à cette conséquence que là où il n'y a pas de transmission de lumière, il ne peut point y avoir de polarisation. Faites tomber, en effet, un faisceau lumineux sur la face intérieure d'un prisme sous l'angle de la réflexion totale, et vous ne trouverez aucune trace de polarisation dans le rayon réfléchi, quoique sous des incidences peu éloignées de celle-là une partie notable de la lumière, ou même sa totalité, soit polarisée.

Les lois que nous venons de rappeler sont, on le voit, beaucoup plus générales que celles de MM. Brewster et Malus.

Page 141, *ligne* 23. — Hook avait formulé nettement avant Young le grand fait de l'interférence de la lumière.

Page 149. — Il est certain que M. Arago employa le premier le biprisme pour reproduire d'une manière facile les phénomènes d'interférence.

Page 164, *ligne* 30. — Nous nous étions trompé; la solution du problème que nous déclarions presque impossible est trouvée depuis longtemps : M. Arago a indiqué le moyen très simple par lequel on parviendra à amener aux conditions d'interférence les rayons lumineux qui, partis d'une source commune, ont été momentanément séparés l'un de l'autre de plusieurs centimètres; il a même fait exécuter, il y a longtemps, l'appareil qui doit réaliser cette interférence.

Page 297, *ligne* 22. — M. Arago a reconnu, il y a bien des an-

nées, que la lumière des arcs secondaires est polarisée, ainsi qu'elle doit l'être dans l'explication donnée par Young. Le même physicien a constaté qu'on ne voit pas ces arcs près de l'horizon. Cela tient sans doute, en partie, à ce que les gouttes de pluie près la terre ont un trop grand diamètre. Il paraît cependant que la condition d'apparition des arcs secondaires est moins la petitesse des gouttes que l'uniformité de leur diamètre.

Page 302, *ligne* 10. — M. Arago veut qu'on reconnaisse que le célèbre Young avait avant lui proclamé la vérité de la théorie de Mariotte.

Page 314, *ligne* 24. — La gloire de l'explication de ce fait, que dans l'atmosphère la polarisation change de sens, appartient tout entière à M. Arago. En se plaçant au haut de l'Observatoire, il vit distinctement la polarisation rectangulaire dans une portion de l'atmosphère que le soleil n'éclairait pas directement. Cette polarisation est le résultat des réflexions secondaires de la lumière diffuse; elle doit nécessairement exister même dans la région éclairée directement par le soleil; son influence peut, par conséquent, et doit neutraliser en partie ou totalement la polarisation directe. Telle est la véritable explication du point neutre.

Ce que nous avons dit de l'atmosphère éclairant en forme d'anneau horizontal, de polarisation dans un plan horizontal, ne semble pas être une représentation exacte des faits. Il ne sera sans doute pas impossible de démontrer par le calcul que les réflexions secondaires doivent donner une polarisation transversale. Mais ici, comme dans tant d'autres circonstances, l'expérience a devancé la théorie.

Page 323. — La conjecture de Newton n'a pas tout le mérite qu'on lui attribue; car, avant qu'il l'énonçât publiquement en 1704 dans la première édition de son *Optique*, les physiciens de Florence, en 1795, avaient fait brûler du diamant au foyer d'une lentille.

Page 315, *ligne* 2. — Nous avons oublié de rappeler une des plus belles observations des temps modernes.

Avant que M. Arago eût découvert la propriété remarquable dont jouissent toutes les substances doublement réfringentes de dé-

polariser le rayon lumineux qui les traverse, on ne parvenait, comme nous l'avons dit, à mettre en évidence la double réfraction qu'en employant des cristaux d'une certaine épaisseur et convenablement taillés. Aujourd'hui, quelque petit que soit le cristal, quelle que soit sa forme, fût-il réduit à n'être qu'une lame mince de sulfate de chaux ou de mica, il suffit de l'interposer sur le trajet d'un rayon polarisé pour prononcer s'il est ou s'il n'est pas doublement réfringent. Si le rayon, en effet, reste polarisé, le cristal ne jouit pas de la double réfraction. Si la polarisation a disparu, il est infiniment probable que la substance en question réfracte doublement la lumière. Nous disons infiniment probable, et non pas certain, parce que quelques substances simplement réfringentes placées dans des conditions données dépolarisent aussi la lumière.

Page 370, *ligne* 28. — La désignation *polarisation circulaire*, déjà appliquée par Fresnel à un autre phénomène, est ici tout à fait impropre : il faut absolument lui en substituer une autre.

Page 373, *ligne* 21. — Ce n'est pas la croix noire qui reparaît, mais une croix colorée et à branches contournées que l'on désigne sous le nom de spirales d'Airy. M. Soleil nous a donné une explication très simple de cette transformation. Quand les molécules de cristaux dextrogyres et lévogyres sont enchevêtrées l'une dans l'autre comme dans l'améthyste, la neutralisation des pouvoirs rotatoires se fait sur place avant que le cristal entier n'ait fait tourner le plan de polarisation d'une quantité proportionnelle à son épaisseur; mais quand on se contente de superposer deux plaques de rotation inverses, le plan de polarisation, avant d'arriver à la seconde, a subi l'effet entier de la rotation due à la première plaque ; la neutralisation ne peut donc pas être aussi complète que dans le premier cas. Cette explication est pleinement confirmée par ce fait remarquable, que les quatre branches des spirales se contournent en sens opposé quand on change l'ordre de superposition des plaques.

Ajoutons encore une remarque curieuse de M. Soleil. Si les spirales sont contournées à droite, la plaque la plus éloignée de l'œil est dextrogyre ; elle serait lévogyre si les spires étaient contournées à gauche.

RÉPERTOIRE

D'OPTIQUE MODERNE.

PREMIÈRE PARTIE.

SECTION PREMIÈRE.

ANALYSE DES TRAVAUX DE M. CAUCHY SUR LA THÉORIE MATHÉMATIQUE DE LA LUMIÈRE.

La théorie mathématique de la lumière qui, depuis un grand nombre d'années, est devenue l'objet des recherches du plus ingénieux, du plus fécond, du plus infatigable de nos géomètres, de M. Cauchy, est aujourd'hui presque complète, et répond à toutes les exigences des faits. Les phénomènes si multipliés et si mystérieux de la propagation de la lumière, de la réflexion, de la réfraction, de la polarisation, de la dispersion, de la diffraction et des ombres, trouvent dans les formules du savant académicien une explication simple et rigoureuse; ils ne sont pas seulement constatés, ils sont prédits et calculés d'avance. L'analyse mathématique, si nuageuse en apparence et si abstraite, a vu sortir de son sein cette admirable synthèse qui embrasse la plus belle partie des sciences physiques, et que la postérité placera à côté du système de l'attraction universelle dont elle est un brillant corollaire. Quoique le nom de M. Cauchy ait retenti souvent au sein de l'Académie et soit devenu populaire, bien peu de personnes ont été jusqu'ici initiées aux secrets de son analyse. Les géomètres s'égarent dans cette multitude de mémoires autographiés, lithographiés, imprimés à Prague, à Turin, à Paris; les physiciens reculent effrayés à la seule

pensée de demander à des notations arides, à des symboles imaginaires des faits qui frappent si vivement leurs regards. Et cependant la théorie de M. Cauchy est vraiment simple, facile et lumineuse. Appelons de tous nos vœux le jour où, réunissant en corps de doctrine ses nombreux mémoires, il aura triomphé de toutes les oppositions, et conquis l'admiration universelle. En attendant, qu'il nous permette de lever un coin du voile par une exposition élémentaire de ses travaux sur la lumière, nous dirons avec simplicité et avec une conviction sincère ce que nous avons compris et ce que nous avons admiré.

Principes généraux. — Propagation du mouvement.

1. Dans un mémoire présenté à l'Académie le 12 janvier 1839, M. Cauchy crut pouvoir affirmer pour la première fois : 1° que les équations du mouvement de la lumière sont renfermées comme cas particulier dans les équations générales qui expriment le mouvement d'un système de molécules très peu écartées de leur position d'équilibre, et sollicitées par des forces d'attraction ou de répulsion mutuelle ; 2° que les phénomènes lumineux ont leur source et leur explication dans les vibrations des molécules de l'éther, en admettant toutefois que ces vibrations ont lieu sans changement de densité. Mais, comme l'avait très bien observé Fresnel, un mouvement sans changement de densité ne peut avoir lieu qu'autant que les vibrations des molécules sont transversales ou perpendiculaires au rayon suivant lequel le mouvement se propage ; il fallait donc démontrer avant tout la possibilité de ce genre de vibrations ; c'est ce que fit d'abord M. Cauchy. L'hypothèse ingénieuse et savante de Fresnel devint une réalité ; il fut admis par tous que les vibrations transversales sont compatibles avec la constitution d'un système de molécules qui s'attirent ou se repoussent mutuellement, du moins lorsque ce système est isotrope, c'est-à-dire lorsque le mouvement s'y propage de la même manière en tous sens.

Les vibrations d'un système de molécules peuvent d'ailleurs être étudiées sous deux points de vue différents et à des époques distinctes : 1° on peut rechercher de quelle manière un mouvement d'abord imprimé à l'éther en une portion de l'espace, donne nais-

sance à des ondes terminées par des surfaces courbes, mais qui s'étendent bientôt de manière à pouvoir être confondues sans erreur sensible avec leurs plans tangents ; 2° on peut se borner à considérer les ondes déjà propagées, parvenues à une grande distance du centre d'ébranlement, réduites par conséquent à leurs plans tangents, et calculer immédiatement les lois de la propagation de ces ondes planes dans les milieux isotropes ou non isotropes. M. Cauchy a examiné la question tour à tour sous ce double point de vue. Il démontra d'abord que le mouvement ne se propage pas toujours instantanément, ou ne s'étend pas nécessairement dès le premier instant jusqu'aux limites du système de molécules données, mais que dans un grand nombre de circonstances et comme l'exige la propagation successive du son et de la lumière, le mouvement se transmet par ondes. M. Cauchy assigna même, en partie du moins, des limites au mouvement, et prouva, toujours en partant des équations générales ou de l'hypothèse d'un ébranlement central, que le mouvement, à un instant donné, n'était plus sensible en-deçà d'une certaine limite intérieure à la surface enveloppe des ondes. Il restait à mettre en évidence l'existence d'une limite extérieure ou à prouver qu'il n'y a en général ni déplacement, ni vitesse au-delà de la plus grande nappe des ondes. M. Blanchet y est parvenu par une analyse très remarquable : les divers Mémoires qu'il a publiés sur ce sujet difficile et important constituent un des plus beaux travaux de physique mathématique, et lui donnent un rang distingué parmi les géomètres. Comme d'ailleurs M. Poisson, et après lui M. Blanchet, se sont assurés, en partant des équations générales du mouvement, qu'à une distance suffisamment grande de l'ébranlement primitif, il n'existe réellement que deux espèces de vibrations moléculaires, dirigées les unes suivant le rayon, les autres perpendiculairement au rayon, on peut aujourd'hui regarder comme rigoureusement démontré le théorème suivant que M. Cauchy avait déduit de la considération hypothétique des ondes planes : le mouvement, supposé d'abord circonscrit dans un très petit espace autour de l'origine des coordonnées, ne sera sensible au bout du temps t que dans une zone terminée par deux surfaces qui sont les enveloppes intérieure et extérieure des positions successives qu'occuperait la surface des ondes si en la rendant mobile avec son centre on faisait

coïncider ce même centre avec chacune des molécules primitivement déplacées ou mises en mouvement.

2. Après s'être bien assuré de l'identité des résultats obtenus par les deux méthodes, M. Cauchy abandonna la considération de l'ébranlement primitif, qui sera toujours un mystère, pour se livrer à l'étude plus attrayante et plus féconde de la propagation des ondes planes. Il avait vu dès le premier instant qu'il réaliserait de cette manière le calcul numérique des phénomènes, et qu'encouragé par la comparaison facile de ses formules avec les observations, il arriverait enfin à fonder une théorie générale qui pût devancer à son tour l'expérience et révéler des lois encore inconnues. Du reste, quel qu'ait été l'état initial du système, on pourra toujours, jusqu'à un certain point, le représenter par un système d'ondes planes superposées en nombre infini et réduites à celles de leurs parties que renferme l'espace dans lequel le mouvement se trouvait primitivement circonscrit, ou s'étendant jusqu'aux dernières limites du système de molécules, mais de telle sorte qu'elles se neutralisent partout, excepté dans l'espace dont il s'agit. Les parties efficaces de ces mêmes ondes se transporteront dans diverses directions indiquées par les rayons vecteurs de la surface enveloppe des positions simultanées des ondes, de telle sorte qu'au bout du temps t les seules dont la superposition subsiste soient des ondes planes contenues dans des plans très peu inclinés les uns sur les autres, et passant par un même point de la surface des ondes. Les plans venant à se déplacer ultérieurement, leur point de rencontre se déplacera lui-même suivant une droite avec une vitesse de propagation distincte de celle des ondes planes. La série des positions que prend ce point de rencontre tandis que les ondes se déplacent, constitue dans la théorie de la lumière ce qu'on nomme un rayon lumineux.

Définition et caractères d'un mouvement simple.

3. Dans un milieu homogène, gazeux, liquide ou cristallisé, les trois équations du mouvement infiniment petit ou les trois équations qui donnent les déplacements infiniment petits d'une molécule quelconque, prennent la forme très simple d'équations linéaires à

coefficients constants. Or, on sait que si plusieurs valeurs des déplacements satisfont à de semblables équations, la somme de ces valeurs y satisfera encore; donc, lorsque plusieurs mouvements infiniment petits seront compatibles avec la constitution d'un système de molécules, ce système pourra prendre un autre mouvement dans lequel les déplacements des molécules seraient représentés par les sommes algébriques des déplacements produits dans les premiers mouvements.

Un moyen fort simple de satisfaire aux équations des mouvements infiniment petits, consiste à supposer que le déplacement parallèle aux axes coordonnés est au bout du temps t donné par des équations de la forme

$$d = ce^{ux + vy + wz - st}$$

dans laquelle les coefficients c, u, v, w, s peuvent d'ailleurs, suivant les circonstances, être réels ou imaginaires. Pour n'avoir à considérer que des quantités réelles, posons

$$u = \mathrm{u} + \mathrm{U}\sqrt{-1},\ v = \mathrm{v} + \mathrm{V}\sqrt{-1},\ w = \mathrm{w} + \mathrm{W}\sqrt{-1},$$
$$s = \mathrm{s} + \mathrm{S}\sqrt{-1},\quad c = \mathrm{C}e^{\alpha\sqrt{-1}},$$

$$\mathrm{k} = \sqrt{\mathrm{u}^2 + \mathrm{v}^2 + \mathrm{w}^2},\quad \mathrm{K} = \sqrt{\mathrm{U}^2 + \mathrm{V}^2 + \mathrm{W}^2},$$
$$\mathrm{kr} = \mathrm{u}x + \mathrm{v}y + \mathrm{w}z.\ \ \mathrm{KR} = \mathrm{U}x + \mathrm{V}y + \mathrm{W}z;$$

On trouvera de cette manière :

$$d = \mathrm{C}e^{\mathrm{KR} - \mathrm{S}t}\, e^{(\mathrm{kr} - \mathrm{s}t + \alpha)\sqrt{-1}}$$

$$d = e^{\mathrm{CR} - \mathrm{S}t} \cos(\mathrm{kr} - \mathrm{s}t + \alpha) + \sqrt{-1}\sin(\mathrm{kr} - \mathrm{s}t + \alpha).$$

La partie réelle du second membre de cette équation sera précisément la valeur du déplacement effectif de la molécule mesuré parallèlement à l'axe dont il s'agit. En l'appelant d, on aura :

$$\mathrm{d} = \mathrm{C}e^{\mathrm{KR} - \mathrm{S}t} \cos(\mathrm{kr} - \mathrm{s}t + \alpha).$$

Ce déplacement constitue une espèce particulière de mouvement infiniment petit que M. Cauchy a désigné sous le nom de mouvement simple et élémentaire. Il est facile à définir par ses propriétés.

I. La valeur du déplacement s'évanouit lorsqu'on a

$$\cos(kr - st + \alpha) = o,$$

et par conséquent elle s'évanouit : 1° pour un molécule donné, à des instants séparés les uns des autres par des intervalles dont le double $T = \frac{2\pi}{S}$ est la durée d'une vibration moléculaire ; 2° à un instant donné pour toutes les molécules comprises dans des plans équidistants, parallèles au plan invariable $ux + vy + wz = o$, et séparés les uns des autres par des intervalles dont le double $l = \frac{2\pi}{k}$ est la longueur d'une ondulation, ou l'épaisseur d'une onde plane.

II. Si l'on fait croître t de Δt et r de Δr, l'équation $\cos(kr - st + \alpha) = o$ continuera de subsister, pourvu que l'on suppose

$$k\Delta r - s\Delta t = o, \quad \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{s}{-} = \frac{l}{T}$$

ce qui prouve que le temps venant à croître, les ondes planes, comme les plans qui les terminent, se déplaceront dans le système de molécules donné avec une vitesse de propagation $\omega = \frac{l}{T}$

III. Ce $^{KR - ST}$ est la demi-amplitude des vibrations relatives à l'axe que l'on considère. C est la valeur de cette amplitude correspondant à $t = o$, $R = o$, ou sa valeur initiale en chaque point du plan invariable $Ux + Vy + Wz = o$. On ne pourra pas supposer que l'amplitude et par conséquent l'exposant $KR - St$ croisse indéfiniment avec le temps, puisqu'il s'agit de mouvements infiniment petits. Il faudra donc que dans cet exposant le coefficient S soit nul ou positif ; dans le premier cas, l'amplitude des vibrations sera constante, et le mouvement simple sera durable et persistant. Dans le second cas, au contraire, cette amplitude décroîtra indéfiniment et pour des valeurs croissantes du temps le mouvement s'éteindra de plus en plus. Le coefficient S a reçu pour cette raison le nom de coefficient d'extinction relatif au temps. Quant au coefficient K par lequel se trouve multipliée la distance R de la molécule du plan invariable $Ux + Vy + Wz = o$, on pourra toujours le supposer né-

gatif, pourvu que l'on choisisse convenablement le sens suivant lequel se comporteront les valeurs positives de R. Alors, pour des valeurs positives croissantes de R, on verra encore l'amplitude des vibrations décroître indéfiniment, ce qui montre que pour un instant donné, le mouvement deviendra de plus en plus insensible à mesure que l'on s'éloignera davantage dans un certain sens du plan invariable $Ux + Vy + Wz = 0$. Il était naturel de donner au coefficient K le nom de coefficient d'extinction relatif à l'espace. Si les deux coefficients d'extinction étaient nuls à la fois, c'est-à-dire si l'on avait $K = 0$, $S = 0$, outre que le mouvement serait persistant, toutes les molécules décriraient des courbes parallèles les unes aux autres.

IV. Enfin, pendant que la molécule achève sa vibration, sa distance à l'axe que l'on considère varie, et cette variation est mesurée en partie par l'angle α qui joue un très grand rôle dans la production de plusieurs phénomènes importants.

En résumé, dans un mouvement simple : 1° la ligne décrite par chaque molécule est une courbe plane ; 2° cette courbe plane est en général une ellipse qui, dans certains cas particuliers, se réduit à une circonférence de cercle ou à une ligne droite ; 3° le plan de cette ellipse est dans un même système constamment parallèle à un premier plan invariable P′; 4° toutes les molécules situées sur une même ligne parallèle à l'intersection de deux autres plans invariables P″, P‴, se trouvent toujours au même instant déplacées d'une même manière et d'une même quantité ; 5° le déplacement mesuré parallèlement à un axe fixe s'évanouit à un instant donné pour toutes les molécules situées dans des plans parallèles au second plan invariable P″. Ces plans divisent le système de molécules en tranches d'une épaisseur constante. Ces tranches sont alternativement de première ou de seconde espèce, en ce sens que les molécules qui en font partie s'écartent alternativement à droite ou à gauche d'une ligne déterminée. Deux tranches consécutives forment ce qu'on appelle une onde plane, dont l'épaisseur l s'appelle aussi longueur d'ondulation ; 6° pour une molécule donnée, le déplacement, mesuré parallèlement à un axe fixe, s'évanouit à des instants séparés les uns des autres par des intervalles de temps égaux à un 1/2 T. Ces intervalles seront eux-mêmes alternativement de première ou de seconde espèce, parce

que la molécule s'écartera alternativement à droite et à gauche. Après deux intervalles consécutifs, la molécule se retrouvera dans les mêmes conditions; de sorte que le temps T représente la durée invariable des vibrations ou oscillations moléculaires mesurées parallèlement à un axe fixe; 7° le temps venant à croître, l'onde plane s'éloigne du second plan invariable P''', et le mouvement se propage avec une vitesse $\omega = \frac{l}{T}$, représentée par le rapport de l'épaisseur d'une onde plane à la durée d'une vibration moléculaire; 8° le mouvement simple peut être durable et persistant, ou tendre sans cesse à s'éteindre; dans le premier cas, toutes les molécules décrivent des ellipses parallèles les unes aux autres, et de telle sorte que le rayon vecteur, mené du centre de l'ellipse à la molécule, trace des aires proportionnelles au temps, et reste parallèle à lui-même et dirigé dans le même sens quand on fait varier la distance de la molécule au second plan invariable de l'épaisseur d'une onde plane, ou d'un multiple de cette épaisseur; dans le second cas, au contraire, cette amplitude décroîtra indéfiniment, tandis qu'on s'éloignera d'un certain plan, qui sera le troisième plan invariable P''', et chaque molécule s'approchera indéfiniment de la position qu'elle occupait dans l'état d'équilibre en décrivant une spirale autour de cette position. Il importait que l'analyse indiquât ces différences qui se trouvent réalisées dans la nature. La lumière se propage sans presque s'affaiblir dans le vide, dans l'air, et dans certains corps transparents, tandis qu'elle s'éteint avec une excessive rapidité en se propageant dans les corps opaques; 9° un mouvement simple quelconque peut toujours être considéré comme résultant de la superposition de trois ou même de deux mouvements rectilignes simples, dans chacun desquels les vibrations des molécules s'effectueraient sur de petites droites parallèles à trois ou à deux lignes déterminées. Telles sont les propriétés nettes et précises d'un mouvement élémentaire.

4. Pour mieux faire saisir la nature de ce genre de mouvement, disons ce qu'il est lorsque la trajectoire de chaque molécule est rectiligne. Si l'on considère dans ce cas les molécules qui se trouvaient primitivement sur une même ligne droite, on verra qu'à une époque quelconque quelques unes de ces molécules conserveront leur position primitive, c'est-à-dire les positions qu'elles occupaient dans l'état

d'équilibre ; les autres s'en écarteront à droite ou à gauche, et leur ensemble, comparable à une corde vibrante, prendra (fig. 1) la forme d'une ligne sinueuse composée d'arcs alternativement situés de part et d'autre de la direction primitive. Les nœuds seront à chaque instant les points où les molécules conserveront ou reprendront leurs positions initiales ; seulement les nœuds qui sont fixes dans une corde vibrante se déplaceront ici d'un instant à l'autre, et seront d'ailleurs de deux espèces, chaque nœud étant de première ou de seconde espèce, suivant que les molécules dont il s'approchera en se déplaçant dans l'espace se trouveront situées d'un côté ou de l'autre par rapport à sa direction primitive. L'épaisseur d'une onde plane, où la longueur d'une ondulation ne sera pas autre chose que la distance entre deux nœuds de même espèce, et la vitesse avec laquelle chaque nœud se déplacera en passant d'une molécule à l'autre, sera ce qu'on nomme la vitesse de propagation. Si la ligne décrite par chaque molécule était non pas une droite, mais un cercle ou une ellipse, on se ferait une idée du mouvement simple en se figurant toutes les molécules situées primitivement sur une même ligne droite comme formant une espèce d'hélice ou de spirale à double courbure.

5. Nous avons surtout rappelé ces formules, afin de montrer comment M. Cauchy, échappant à toutes les abstractions mathématiques, était arrivé à une théorie complétement physique des faits. Son équation fondamentale renferme, indépendamment du temps, huit quantités qui toutes ont une signification physique très précise. C est l'amplitude initiale d'un certain nombre de molécules ; K, un premier coefficient d'extinction relatif à l'espace ; R, la distance du plan à partir duquel ce premier genre d'extinction a lieu ; S, un second coefficient d'extinction relatif au temps ; k, une quantité inversement proportionnelle à la longueur d'ondulation l, ou à l'épaisseur d'une onde plane ; r, la distance à un plan invariable parallèle aux plans de toutes les ondes ; s, une quantité inversement proportionnelle à la durée des vibrations moléculaires T ; de α enfin dépend en partie la phase de la molécule ou l'angle variable dont le cosinus représente le rapport actuel du déplacement de la molécule à la demi-amplitude des vibrations, mesurée parallèlement à un certain axe fixe. Pour arriver à constituer complétement le mou-

vement infiniment petit, il fallait encore une autre quantité, la vitesse de propagation des ondes : cette vitesse est le rapport entre la longueur d'ondulation et la durée d'une vibration moléculaire.

6. Si, sans connaître la valeur des déplacements moléculaires et les lois du mouvement, on se demandait *à priori* quelles quantités peuvent et doivent entrer dans l'idée complète de ces déplacements ou de ces lois, il nous semble qu'il serait impossible de ne pas revenir à l'énumération que nous venons de faire, et cette impossibilité est une preuve certaine de la vérité de la théorie que nous exposons. Ce que nous venons de dire rend pour nous inexplicable l'attaque si brusque de M. Mac-Cullagh contre la théorie de M. Cauchy. Dans la réunion de l'Association britannique, tenue à Manchester, le savant irlandais a soutenu que la théorie des ondes manque de principes physiques; qu'elle est presque purement mathématique; que des faits certains, le fait, par exemple, de la polarisation circulaire, contredisent les principes de M. Cauchy, tels qu'ils sont exprimés dans son équation fondamentale. Nous avons entendu M. Mac-Cullagh; il a développé devant nous ses objections, mais sans nous convaincre nullement : bien loin de là, la théorie de M. Cauchy n'en est devenue pour nous que plus évidente; ajoutons que les nouvelles applications faites depuis par l'illustre académicien français à l'étude des ombres et de la diffraction, dissipent tous les nuages. Que M. Mac-Cullagh publie prochainement, comme l'en a prié le congrès, sa prétendue réfutation mathématique de la théorie de M. Cauchy, c'est pour lui un engagement d'honneur.

Ce qui précède montre aussi jusqu'à l'évidence que la méthode suivie par M. Cauchy n'est pas la méthode d'interpolation; elle en diffère autant que la nuit du jour. La forme des équations de M. Cauchy et le nombre de leurs coefficients sont complétement déterminés et nullement arbitraires : aussi ce qu'il obtient d'abord n'est pas, comme dans l'interpolation, le calcul de certains faits dans des limites déterminées, mais des lois sans nombre dont la généralité étonne, et qui seules pouvaient expliquer des séries entières de phénomènes d'ordre très différents. M. Cauchy ne s'appuie pas, comme Fresnel, sur des analogies plus ou moins vraisemblables, sur des interprétations plus ou moins heureuses des indications obscures de l'analyse : il établit des formules générales dont les conséquences

sont inévitables. Il ne demande pas à l'observation des nombres déduits d'expériences analogues à celles qu'il veut calculer, mais seulement ce qui est nécessaire pour définir et particulariser la nature du mouvement et des milieux dans lesquels il s'effectue. Ainsi, par exemple, quand M. Cauchy aura à déterminer la quantité de lumière réfléchie à la surface d'un métal, il demandera, non pas des expériences photométriques faites sous certaines incidences, mais seulement deux angles qui définissent ce métal et le séparent de tous les autres en fournissant l'indice de réfraction et le coefficient d'extinction qui lui sont propres. Comme une semblable théorie est inflexible, une seule expérience suffit à la renverser; mais aussi quand, par des comparaisons nombreuses avec l'observation, on s'est assuré de la vérité, on peut tout en attendre, car elle est essentiellement féconde.

7. On nous pardonnera ces réflexions, que nous ne pouvions placer plus tôt, et qui pouvaient seules donner une idée bien exacte de la manière de M. Cauchy. Elles renferment d'ailleurs la réponse aux principales objections dont sa théorie a été l'objet. On lui a reproché encore de n'avoir pas suivi une marche assez logique: puisqu'il se proposait d'établir les lois du mouvement de l'éther, il devait, disait-on, commencer par définir, par constituer son éther en lui donnant un nombre suffisant de propriétés caractéristiques; ces propriétés l'auraient conduit aux véritables équations du mouvement; l'intégration de ces équations devait seule mettre en évidence l'ensemble des phénomènes. M. Cauchy a repoussé cette marche, parce qu'il l'a crue dangereuse et stérile; nos lecteurs peuvent déjà juger s'il a bien fait. Une comparaison éclairera peut-être cette discussion. Quand les anciens géomètres voulaient étudier les propriétés de l'ellipse, de l'hyperbole ou de la parabole, ils définissaient chacune de ces courbes par un caractère exclusif; plus tard on apprit à les réunir à l'aide d'une propriété commune et d'une même équation; dans le XIXᵉ siècle, enfin, on crut faire un grand pas en partant de l'équation la plus générale du second degré, qui, en se particularisant tour à tour par une marche élégante et sûre, mettait bientôt en évidence les propriétés des nombreuses variétés de courbe qu'elle représentait. C'était évidemment un progrès que M. Cauchy n'a pas voulu méconnaître. Il s'est trouvé ainsi

amené à envisager d'abord sous un point de vue tout-à-fait général le mouvement d'un système de molécules qui s'attirent ou se repoussent. De l'idée d'un mouvement quelconque il est descendu à l'idée d'un mouvement infiniment petit; l'idée d'un mouvement infiniment petit l'a conduit à l'idée du mouvement simple; arrivé à l'idée d'un mouvement simple, il sent la nécessité de particulariser encore, et de considérer séparément les deux mouvements simples dans lesquels les vibrations moléculaires longitudinales ou transversales s'exécutent parallèlement ou perpendiculairement à la direction suivant laquelle les ondes se propagent.

Double système de vibrations longitudinales et transversales. — Polarisation du mouvement. — Application à la lumière.

8. Le calcul prouve en effet que lorsqu'un mouvement simple et persistant se propage dans un milieu isotrope, il ne peut donner naissance en réalité qu'à deux espèces de vibrations, les unes longitudinales et dirigées perpendiculairement au plan des ondes ou dans le sens de la propagation du mouvement, les autres transversales et parallèles au plan des ondes. Ces deux systèmes de vibrations constituent deux mouvements élémentaires particuliers que nous désignerons pour abréger sous les noms de mouvement longitudinal et transversal. Dans le mouvement transversal la dilatation du volume est nulle, ou en d'autres termes la densité du milieu demeure constante. Il n'en est pas de même du mouvement longitudinal. Ces deux espèces de mouvements doivent évidemment donner naissance à des ordres de phénomènes tout-à-fait distincts. On a toujours pensé jusqu'ici que les phénomènes du son avaient pour cause la propagation dans les corps solides et liquides ou gazeux, et surtout dans l'air, d'un mouvement élémentaire longitudinal; et Fresnel a tout mis en œuvre pour prouver que le mouvement de l'éther qui donne naissance aux phénomènes lumineux était un mouvement transversal ou sans changement de densité. M. Cauchy défend la même thèse que Fresnel, et nous offre une démonstration rigoureuse des hypothèses du savant physicien. Cette démonstration consiste à déterminer par l'analyse toutes les propriétés du mouvement transversal, tous les phénomènes qui résultent de sa pro-

pagation, pour les comparer plus tard aux phénomènes produits par la lumière, et voir si l'identité est réellement complète.

9. Avant d'étudier les propriétés d'un mouvement simple transversal, les lois de sa propagation, etc..., disons que ce qui constitue le mode de polarisation d'un semblable mouvement, c'est la nature de la courbe décrite par chaque molécule. Dans un milieu qui n'éteint pas le mouvement, cette courbe sera toujours une ellipse, un cercle ou une droite, et la polarisation du mouvement simple sera elliptique dans le premier cas, circulaire dans le second, rectiligne dans le troisième. Ces trois modes de polarisation peuvent aussi se présenter dans un milieu qui éteint le mouvement, lorsque la ligne décrite par chaque molécule est renfermée dans un plan parallèle au troisième plan invariable, c'est-à-dire quand le troisième plan invariable P‴ se confond avec le premier. Nous verrons bientôt quelles sont les propriétés caractéristiques de ces divers genres de polarisation, et à l'aide de quels phénomènes on peut les mettre en évidence. Dans le cas particulier où la polarisation du mouvement est rectiligne, le plan de ce qu'on peut alors appeler le rayon, et son plan de polarisation, sont deux plans, rectangulaires entre eux, qui passent par la direction de propagation du mouvement, et dont le premier contient en outre les directions des vibrations moléculaires. Alors aussi l'on dit que le rayon est renfermé dans le premier plan et polarisé suivant le second. Dans son premier Mémoire sur la théorie mathématique de la lumière, publié en 1829, M. Cauchy avait modifié les définitions de Fresnel ; il avait cru que Fresnel s'était trompé en admettant que les vibrations des molécules éthérées étaient sensiblement perpendiculaires au plan de polarisation. Dans la réalité, disait M. Cauchy, le plan de polarisation renferme la direction du rayon et celle des vibrations de l'éther. Une étude plus approfondie des faits et de ses formules a ramené le géomètre aux conclusions du physicien. Définitivement, le plan de la polarisation est perpendiculaire aux directions des vibrations moléculaires. Pourquoi faut-il que les géomètres anglais, allemands et même français, qui prirent parti contre Fresnel, persistent à marcher dans une voie qui les éloigne de plus en plus de la vérité? Puissent-ils bientôt imiter M. Cauchy, et rendre, comme lui, hommage à l'illustre promoteur de la théorie des ondulations ! Que M. Mac-Cullagh mette donc bas les armes, puisqu'il

est prouvé rigoureusement que le rayon réfléchi ne peut disparaître sous aucune incidence quand l'indice de réfraction ne se réduit pas à l'unité; d'où il résulte nécessairement qu'un rayon polarisé dans un plan est, comme le croyait Fresnel, un rayon simple dans lequel les vibrations sont perpendiculaires à ce plan, ou, en d'autres termes, que le plan de polarisation d'un rayon simple est le plan perpendiculaire aux droites suivant lesquelles sont dirigées les vibrations rectilignes des molécules éthérées.

10. On démontre sans peine que dans un milieu isotrope et qui n'éteint pas, un mouvement simple polarisé, soit rectilignement, soit elliptiquement, soit circulairement, peut toujours être considéré comme résultant de la superposition de deux mouvements simples polarisés rectilignement et renfermés dans deux plans perpendiculaires l'un à l'autre. L'amplitude des vibrations moléculaires, ainsi que la quantité dont dépend en partie la phase de la molécule, changera généralement de valeur quand on passera de l'un des mouvements simples composants à l'autre. Pour que le mouvement résultant soit polarisé en ligne droite, il faut que les quantités α, α' relatives aux deux rayons composants soient égales ou offrent pour différence un multiple du nombre k, ce qui exprime que les deux rayons composants, qui pourront d'ailleurs avoir des amplitudes différentes, offrent les mêmes nœuds; les nœuds de première espèce de l'un pouvant coïncider avec les nœuds de première ou de seconde espèce de l'autre. Si d'ailleurs on suppose que dans le milieu donné la propagation du mouvement s'effectue en tous sens suivant les mêmes lois, le plan de la polarisation du rayon résultant formera avec les plans de polarisation des rayons composants des angles dont les tangentes trigonométriques seront les rapports directs et inverses de l'amplitude des vibrations de l'un à l'amplitude des vibrations de l'autre.

Le mouvement résultant sera polarisé circulairement si les amplitudes des vibrations moléculaires sont les mêmes dans les deux rayons composants, et si, de plus, les quantités α, α' diffèrent dans ces deux rayons, ou de l'angle droit représenté par $\pi/2$, ou du produit de cet angle par un nombre impair, en sorte que la distance entre deux nœuds consécutifs appartenant à l'un et à l'autre mouvement, soit précisément le quart d'une ondulation lumineuse.

Si les amplitudes des vibrations ne sont pas égales, et si les nœuds

des deux mouvements ne coïncident pas, ou même si seulement les nœuds ne sont pas à la distance d'un quart d'ondulation, le mouvement simple sera polarisé elliptiquement.

11. On voit par ce qui précède que l'analyse fournit des moyens très nets de distinguer l'un de l'autre ces trois genres de polarisation. Ils sont complétement déterminés quand, dans la formule qui donne le déplacement $d = Ce^{KR-st} \cos (kr-st + \alpha)$, on connaît l'amplitude Ce^{KR-st}, et l'angle α, que M. Cauchy appelle le paramètre angulaire relatif au mouvement dont il s'agit. Lorsque le milieu dans lequel la propagation a lieu n'éteint pas du tout le mouvement, on a $K=0$, $S=0$, $d=C \cos (kr-st+\alpha)$; et alors pour savoir quel est le genre de polarisation, il suffit de connaître, pour les deux rayons composants, l'amplitude C et le paramètre α; le rapport de ces amplitudes donnera de plus la direction du plan de polarisation dans le cas où la polarisation sera rectiligne.

M. Cauchy détermine avec une extrême facilité les modifications que subissent, après un nombre quelconque de réflexions ou de réfractions, l'amplitude Ce^{KR-st} et le paramètre angulaire α; il peut donc, après toutes ces réflexions et tous ces réfractions, assigner le mode de polarisation du mouvement, et dire s'il sera rectiligne, circulaire ou elliptique.

12. D'un autre côté, les physiciens donnent des moyens sûrs de reconnaître si un rayon lumineux est polarisé rectilignement, circulairement ou elliptiquement. Ainsi : 1° un rayon lumineux polarisé rectilignement est incapable de réflexion sous un certain angle sur un plan perpendiculaire au plan de polarisation ; il ne peut pas être transmis par une tourmaline perpendiculaire au rayon, et dont l'axe se trouve dans le plan de polarisation ; il ne donne qu'une image quand il traverse un spath d'Islande dont la section principale est parallèle ou perpendiculaire au plan de polarisation ; 2° un rayon polarisé circulairement offre constamment, en traversant un prisme biréfringent, deux images de même intensité, et se partage, en traversant une lame de cristal parallèlement à l'axe, en deux rayons de couleurs complémentaires, etc. Il sera donc possible de faire à chaque instant l'application de la théorie aux phénomènes de la nature, et de comparer les résultats du calcul aux données de l'expérience. Mais l'on conçoit que l'analyse aura d'immenses avantages sur la méthode

d'expérimentation, toujours entourée de mille difficultés quand il s'agit de déterminer, non pas seulement la direction d'un rayon lumineux, mais l'amplitude des vibrations ou l'intensité de la lumière, et le déplacement des nœuds. Ces déterminations seraient même impossibles si la théorie n'avait mis au jour les relations nécessaires qui lient cette amplitude et ces déplacements insaisissables en eux-mêmes avec le mode de polarisation et la direction du plan dans lequel cette polarisation a lieu, quand elle est rectiligne. Remarquons encore que M. Cauchy peut calculer les variations d'amplitude et les déplacements des nœuds, non seulement quand le mouvement se réfléchit à la surface des corps non métalliques, ou quand il se propage par réflexion ou par réfraction dans des milieux isotropes et qui n'éteignent pas, mais encore lorsque le mouvement se réfléchit à la surface des métaux ou pénètre dans des corps non isotropes et qui l'éteignent plus ou moins. Sa théorie a toute la généralité possible, et se distingue de toutes les théories plus ou moins particulières, plus ou moins hypothétiques de Fresnel, de MM. Herschell, Airy, Newmann, etc..., parce qu'il a été assez heureux pour faire dépendre l'amplitude du déplacement des deux coefficients d'extinction K et S, l'un relatif à l'espace, l'autre relatif au temps. Par ce moyen, l'action des métaux sur la lumière, qui avait paru inexplicable à Malus, que Fresnel appelait une bouteille à l'encre, que MM. Brewster et Biot avaient essayé d'éclaircir à l'aide d'expériences aussi ingénieuses que délicates, est devenue l'objet d'une des plus belles et des plus faciles applications de l'analyse.

13. Cette théorie des mouvements simples trouve-t-elle réellement son application lorsqu'il s'agit de la lumière? Peut-on dire que la lumière est le résultat d'un mouvement simple ou élémentaire qui se propagerait dans le système de molécules connu sous le nom d'éther, ou que du moins les phénomènes lumineux ont leur source dans la superposition d'un nombre fini ou indéfini de semblables mouvements? Les molécules lumineuses décrivent-elles réellement, non pas, comme le supposait Newton, des lignes droites indéfinies, mais de petites lignes droites, de petits cercles, ou enfin de petites ellipses qu'elles parcourent de manière à repasser après des intervalles de temps égaux par les mêmes points? Telle est, nous le répé-

tons, la grande question agitée de nos jours, et que M. Cauchy croit avoir résolue.

On peut arriver à cette solution par deux voies différentes, l'une directe, l'autre indirecte ; M. Cauchy les a suivies tour à tour. On peut chercher d'abord à déterminer par expérience si les molécules lumineuses décrivent réellement la ligne que le calcul leur assigne dans des circonstances déterminées. Ainsi, par exemple, l'analyse prouve que les molécules qui forment un rayon lumineux réfléchi par certaines surfaces sous un angle déterminé, pour le verre par exemple, sous l'angle de 35°, doivent décrire de petites lignes droites et reproduire le mouvement élémentaire défini n° 3. Cela a-t-il lieu en effet? L'expérience semble dire effectivement que oui, car tous les phénomènes résultant de cette réflexion particulière s'expliquent très bien dans cette hypothèse. De même M. Cauchy affirme que si un rayon lumineux est réfléchi à la surface extérieure de certains corps, des métaux polis par exemple, etc., les molécules qui en font partie décrivent un cercle et plus généralement une ellipse ; il indique même le moyen de déterminer expérimentalement le rapport entre les deux axes de cette ellipse ; il va plus loin, il regarde cette expérience comme déjà réalisée, parce qu'elle est la conséquence immédiate d'autres expériences faites par M. Brewster, et qui s'accordent admirablement avec ses calculs. Sans avoir aucune raison de révoquer en doute les assertions du savant géomètre, nous osons dire que notre conviction sera plus entière quand quelque habile physicien aura fait l'expérience demandée, et montré par des observations précises que le rapport des deux axes de l'ellipse étant ce que le calcul annonce, cette ellipse, loin d'être imaginaire, est bien la courbe décrite par la molécule lumineuse. Le jour qui éclairera cette expérience sera pour la science un grand jour ; nous l'appelons de tous nos vœux.

Sans déterminer directement, ce qui est plus difficile peut-être, si la ligne décrite par les molécules est bien dans la nature ce qu'elle est dans les équations du mouvement, M. Cauchy pouvait espérer de mettre en évidence la vérité du système des ondulations en examinant si la propagation d'un ou de plusieurs mouvements élémentaires peut donner naissance à des phénomènes parfaitement identiques avec ce que nous sommes convenus de désigner sous le nom

de phénomènes lumineux; si un semblable mouvement est réfléchi, réfracté, etc.; si les lois de cette réflexion, de cette réfraction, etc., sont réellement les lois de la réflexion et de la réfraction de la lumière.... Suivons-le dans cette comparaison.

Réflexion et réfraction du mouvement simple. — Conditions aux limites. — Direction des ondes réfléchies et réfractées.

14. Il serait déraisonnable de chercher à établir les lois de la réflexion et de la réfraction d'un mouvement simple avant d'avoir défini les équations de conditions relatives aux limites des corps, ou qui doivent se trouver vérifiées à la surface de séparation de deux milieux. Malgré les nombreux travaux des géomètres sur cette question, il est vrai de dire qu'il n'existait pas de méthode générale propre à conduire à ces équations. Dans les divers cas particuliers traités jusqu'à ce jour, on se bornait à faire des hypothèses plus ou moins vraisemblables sur la forme des conditions aux limites, sans chercher à les déduire de méthodes rigoureuses. C'est ainsi que dans la théorie des liquides, des corps élastiques, etc., on supposait, sans le démontrer, les pressions intérieures et extérieures égales entre elles à de petites distances des surfaces qui terminent ces corps ou ces liquides. Mais de semblables hypothèses n'offraient rien de satisfaisant à l'esprit; souvent même elles étaient fausses, et d'immenses travaux se trouvant par là frappés de stérilité, ne conduisaient qu'à un très petit nombre de résultats conformes à l'expérience. M. Cauchy a été assez heureux pour obtenir enfin la méthode générale qu'il poursuivait depuis si long-temps: c'est un progrès immense; un nouveau champ est désormais ouvert à la physique mathématique. Entrons à ce sujet dans quelques détails.

15. Il est clair que les déplacements moléculaires, et celles de leurs dérivées que ne déterminent pas les équations aux dérivées partielles des mouvements infiniment petits, ne sauraient varier d'une manière brusque, tandis que l'on passera d'un milieu à l'autre: donc ces déplacements et ces dérivées, calculés successivement pour l'un et l'autre milieu, devront satisfaire à la condition de reprendre toujours les mêmes valeurs en chaque point de la surface de séparation. Comme les altérations qu'éprouve la constitution de

chaque système dans le voisinage de la surface réfléchissante, ne sont sensibles qu'à une très petite distance de la surface, la conclusion précédente doit être étendue au cas même où l'on tient compte de ces altérations, pourvu que le diamètre de la sphère d'activité sensible des molécules éthérées soit très petit relativement à la longueur d'une ondulation. Cette condition, donnée par le calcul, pouvait être assez facilement prévue : on conçoit en effet que, dans le cas où elle ne serait pas remplie, les mouvements simples ou par ondes planes se trouveraient sensiblement altérés par l'influence de la surface réfléchissante à des distances trop considérables encore pour qu'ils pussent franchir ces distances, et pénétrer en se modifiant dans ce second milieu. Si, au contraire, la condition ci-dessus énoncée se trouve remplie, on déduira immédiatement du principe que nous venons d'énoncer les lois de la réflexion et de la réfraction produites par la surface de séparation de deux milieux transparents ou opaques; mais il sera rigoureusement nécessaire d'avoir égard aux trois espèces de mouvements qui peuvent généralement se propager dans chaque milieu. Si l'on tenait compte seulement des deux ondes à vibrations transversales, ou qui peuvent être perçues par l'œil dans les milieux transparents, les six équations de condition relatives à la surface réfléchissante ne pourraient plus être vérifiées que dans des cas particuliers, par exemple, pour certaines directions particulières de l'onde incidente. Au reste, nous ne devons pas être surpris que, dans chaque milieu, la réflexion ou la réfraction produise seulement deux ondes sensibles à l'œil, et que le troisième mouvement réfléchi ou réfracté reste inaperçu; car le calcul fait voir que ce troisième mouvement, qui, s'il pouvait se propager sans s'affaiblir, offrirait des vibrations longitudinales, est de la nature des ondes qui pénètrent dans les corps opaques, et s'éteint comme elles à une très petite distance de la surface réfléchissante. Mais cette circonstance ne nous autorise en aucune manière à le considérer comme non avenu, attendu que, sur la surface même, les amplitudes des vibrations moléculaires sont du même ordre, dans les trois espèces de mouvements réfléchis ou réfractés. D'ailleurs, quoique la troisième onde ne soit pas sensible, son existence et même sa nature sont clairement indiquées par le calcul, et il est impossible qu'un mouvement simple, tombant sur la surface de séparation de deux milieux, ne fasse

pas naître dans chacun de ces milieux trois mouvements simples, réfléchis ou réfractés. Ces trois mouvements simples, et les trois systèmes d'ondes planes qu'ils présentent, correspondent aux trois racines inégales d'une certaine équation caractéristique résolue par rapport au carré du coefficient qui détermine la durée des vibrations moléculaires. Ces trois racines elles-mêmes se trouvent introduites dans l'équation dont il s'agit en raison des trois coordonnées qui appartiennent à chaque point, et qui correspondent aux trois dimensions de l'espace : ainsi le nombre des dimensions de l'espace exprime nécessairement le nombre des mouvements réfléchis ou réfractés par une surface plane.

Si les deux milieux deviennent isophanes, les trois ondes réfléchies ou réfractées se réduiront à deux, et de plus les vibrations moléculaires des mouvements réfléchis et réfractés qui s'éteindront à une petite distance de la surface réfléchissante, resteront comprises dans le plan d'incidence, et par suite, on pourra faire abstraction de ces deux mouvements, si les vibrations des molécules dans le mouvement incident sont perpendiculaires au plan d'incidence, ou si le mouvement est polarisé dans ce plan.

Si les vibrations des molécules dans le mouvement incident étaient, non plus perpendiculaires au plan d'incidence, mais renfermées dans ce plan, alors, dans la recherche des lois de la réflexion et de la réfraction, on devra nécessairement tenir compte des ondes qui s'éteignent à une petite distance de la face réfléchissante. Cette heureuse nécessité dispensera de recourir au principe erroné de la prétendue équivalence des vibrations moléculaires dans les deux milieux; principe que Fresnel appliquait sans erreur à la réflexion des vibrations perpendiculaires au plan d'incidence, mais que rien ne justifie dans la théorie de M. Mac-Cullagh, qui l'étend à tous les cas, sans tenir compte des mouvements qui s'éteignent à une petite distance de la surface réfléchissante. Répétons-le encore : il résulte d'une analyse rigoureuse, que pour rendre compte de tous les phénomènes de la réflexion et de la réfraction, il faut joindre au mouvement incident les mouvements réfléchis et réfractés à vibrations transversales qui restent sensibles à une grande distance et de plus le mouvement aux vibrations longitudinales qui n'est pas sensible à l'œil et s'éteint à une petite distance de la surface réfléchissante.

16. Il ne sera pas inutile de présenter ces considérations sous un nouveau point de vue. Lorsqu'un mouvement incident donne naissance, dans un milieu isophane, à un mouvement simple réfléchi et à un mouvement simple réfracté, qui, comme lui, se propage sans s'affaiblir, alors il arrive de deux choses l'une : ou le système des mouvements incident et réfléchi, propagés dans le premier milieu, s'accorde en chaque point de la surface réfléchissante, avec le mouvement réfracté qui se propage dans le second milieu, de sorte que, sur cette surface, les déplacements moléculaires et leurs dérivées, calculés dans le premier et le second milieu, reprennent toujours les mêmes valeurs; ou cet accord n'existe point, et, pour le rétablir, on sera obligé de superposer aux trois mouvements, incident, réfléchi, réfracté, qui, par hypothèse, se propagent sans s'affaiblir, d'autres mouvements correspondants, qui, étant insensibles à de grandes distances de la surface, deviennent sensibles dans son voisinage. Dans le premier cas, le système des mouvements incident et réfléchi se transformera de lui-même, et sans transition brusque, en traversant la surface réfléchissante, en mouvement réfracté. Mais dans le second cas, cette transformation sans transition brusque ne deviendra possible que par la superposition indiquée. Le premier cas se présente dans la théorie de la lumière réfractée par la surface de séparation de deux milieux isophanes, lorsqu'on suppose le rayon lumineux polarisé suivant le plan d'incidence, c'est-à-dire, en d'autres termes, lorsqu'on suppose les vibrations du fluide éthéré parallèles à la surface réfléchissante. Alors les lois de la réflexion et de la réfraction sont beaucoup plus faciles à établir que dans toute autre supposition, et il est permis de faire abstraction des mouvements simples qui pourraient se propager dans l'éther, sans occasionner des phénomènes lumineux. Mais il n'en est plus ainsi dans la supposition contraire, et c'est ce qui explique pourquoi Fresnel a eu plus de peine à découvrir les formules relatives à la réflexion d'un rayon de lumière polarisé perpendiculairement au plan d'incidence.

17. Dans ce qui précède nous avons supposé que chaque milieu renferme un seul système de molécules, toutes les molécules étant de même nature, mais leur arrangement pouvant n'être pas le même dans le premier milieu et dans le second. Le vide ou l'éther isolé peut

offrir un tel milieu, et ce milieu est certainement isophane. Chacun des autres milieux renferme nécessairement un ou plusieurs systèmes de molécules, par exemple les molécules de l'éther et les molécules d'un corps solide, liquide ou gazeux. Donc appliquer aux seules molécules d'éther les principes ci-dessus établis, c'est supposer que, dans le calcul des phénomènes relatifs à la réflexion et à la réfraction de la lumière, on peut, sans erreur sensible, faire abstraction des vibrations imprimées aux molécules des corps. On s'approchera davantage de la réalité, si l'on tient compte de ces dernières vibrations. Mais alors le nombre des mouvements réfléchis et réfractés sera doublé, aussi bien que le nombre des racines de l'équation caractéristique et le nombre des équations de condition relative à la surface réfléchissante. Alors aussi trois racines de l'équation caractéristique seront analogues à celles qui fournissent les mouvements simples de l'éther dans le vide, trois autres se rapporteront plus spécialement aux vibrations des molécules des corps. On pourrait dans ce cas distinguer parmi les mouvements réfléchis et réfractés, ceux qui proviendront directement du rayon immédiat, et ceux qui en proviendront indirectement, étant produits par les vibrations des molécules renfermées dans le second milieu. Ces conclusions seraient conformes à des expériences remarquables publiées par M. Arago sur la lumière qui émane des corps incandescents, et à l'explication que l'illustre physicien en a donnée.

Il est d'ailleurs naturel de penser que les rayons dont il s'agit, avec les six mouvements simples qui leur correspondent, et auxquels participent à leur manière les molécules des corps, fourniront l'explication des phénomènes dus à ce qu'on nomme les rayons chimiques, calorifiques.

Il nous semble que ces considérations si neuves, si précises, si délicates, suffisent seules à prouver l'étonnante supériorité de M. Cauchy.

18. Un mouvement simple se réfléchit donc réellement et se réfracte; et remarquons que dans la théorie si simple et si générale que nous analysons, cette réflexion et cette réfraction ne sont pas seulement admises comme des faits qu'il s'agit d'expliquer d'une manière quelconque: leur existence est démontrée d'une manière entièrement conforme à la nature; elles existent parce qu'elles sont la conséquence naturelle et nécessaire du mouvement incident

Voici d'ailleurs quelles sont les lois de la réflexion ou de la réfraction du mouvement incident.

1° La durée des vibrations moléculaires mesurées parallèlement à un axe fixe restera la même dans les ondes incidentes, réfléchies et réfractées.

2° Les traces du second et du troisième plan invariable sur la surface réfléchissante, demeureront fixes lorsqu'on passera du mouvement donné au mouvement réfléchi ou réfracté, et coïncideront toujours avec une droite unique parallèle aux plans de toutes les ondes, c'est-à-dire aux plans qui termineront les ondes incidentes réfléchies et réfractées.

Si par un point de cette droite on élève des perpendiculaires aux plans des trois espèces d'ondes, ces perpendiculaires formeront avec la normale, à la surface réfléchissante, des angles égaux à ceux que forment les plans des ondes avec la surface elle-même, et se trouveront d'ailleurs comprises dans un même plan normal à la surface. Les angles d'incidence, de réflexion et de réfraction, seront les angles aigus formés par les perpendiculaires dont il s'agit avec la normale à la surface réfléchissante, ou en d'autres termes par les plans des trois espèces d'ondes avec la surface elle-même. Le plan unique qui renfermera les trois perpendiculaires pourra être nommé à volonté le plan d'incidence, de réflexion ou de réfraction. Cela posé :

3° Le rapport entre le sinus d'incidence, c'est-à-dire le sinus de l'angle d'incidence, et l'épaisseur d'une onde incidente sera le même que le rapport entre le sinus de réflexion et l'épaisseur d'une onde réfléchie, le même aussi que le rapport entre le sinus de réfraction et l'épaisseur d'une onde réfractée. Si l'on nommait, pour abréger, *indices de réflexion et de réfraction* les rapports que l'on obtient en divisant l'épaisseur des ondes incidentes par les épaisseurs des ondes réfléchies et réfractées, cette dernière loi pourrait s'énoncer comme il suit : Les rapports du sinus d'incidence au sinus de réflexion, ou de sinus d'incidence au sinus de réfraction sont toujours égaux respectivement aux indices de réflexion et de réfraction.

4° Supposons que les deux milieux soient isotropes, ou que la propagation du mouvement s'y effectue de la même manière en tous sens, et de plus que chacun des mouvements simples qui répon-

dent aux ondes incidentes, réfléchies, réfractées, soit un mouvement persistant; alors l'épaisseur de l'onde réfléchie sera la même que celle des ondes incidentes, et par conséquent l'angle de réflexion sera égal à l'angle d'incidence. L'épaisseur des ondes réfractées sera au contraire différente, ordinairement du moins, de l'épaisseur des ondes incidentes; mais ces deux épaisseurs seront constantes, et par suite le rapport entre le sinus d'incidence et le sinus de réfraction égal au rapport entre l'épaisseur des ondes incidentes et l'épaisseur des ondes réfractées, sera constant, c'est-à-dire indépendant de l'angle d'incidence.

19. Ces lois générales de la réflexion et de la réfraction des ondes planes dans les mouvements simples, sont indépendantes des formes particulières que peuvent prendre les équations de condition qui se rapportent à la surface de séparation. La démonstration élégante et si naturelle qu'en donne M. Cauchy montre pourquoi elles subsistent dans un grand nombre de questions diverses, où les démonstrations qu'on en donnait doivent maintenant paraître peu rigoureuses. Ainsi, par exemple, si les premières de ces lois fournissent immédiatement l'explication des phénomènes que présente la réflexion des ondes sonores ou liquides par les murs ou parois d'une salle ou d'un bassin rectangulaire, ce n'est point une raison d'admettre, comme on le faisait en théorie, que ces murs ou ces parois sont des corps dénués de toute élasticité, en sorte que les molécules situées à leur surface ne cèdent nullement à l'action des molécules contiguës de l'air ou de l'eau; on doit supposer au contraire que chaque mouvement simple, propagé dans l'air ou dans l'eau, donne naissance, d'une part à un mouvement réfléchi qui reste sensible pour l'observateur, d'autre part à un mouvement réfracté qui se propage dans les murs de la salle ou les parois du bassin rectangulaire, mais qui est assez faible pour échapper à nos sens, et décroît très rapidement en pénétrant dans la profondeur de ces murs ou de ces parois, de manière à s'éteindre presque entièrement à une profondeur finie.

20. Il est inutile de demander si ces lois de la réflexion et de la réfraction d'un mouvement simple sont bien les lois de la réflexion et de la réfraction de la lumière: l'identité est parfaite; seulement l'analyse, plus subtile et plus précise que l'expérience, a tout prévu. A

la loi moins générale de l'égalité entre le sinus de réflexion et d'incidence, ou du rapport constant entre les sinus d'incidence et de réfraction, elle a substitué la loi si remarquable et si simple de la proportionnalité des épaisseurs des ondes incidentes, réfléchies et réfractées, aux sinus d'incidence, de réflexion et de réfraction. Elle nous apprend que l'angle d'incidence ne sera égal à l'angle de réflexion, ou que le rapport des sinus d'incidence et de réfraction ne sera constant que dans le cas où les deux milieux étant isophanes et parfaitement transparents, la lumière s'y propagera de la même manière en tous sens et sans s'affaiblir, parce qu'alors seulement l'épaisseur des ondes réfléchies sera la même que celle des ondes incidentes, et l'épaisseur des ondes réfractées constante ou indépendante de l'angle d'incidence, du moins pour toutes les incidences propres à fournir un rayon réfracté qui se propage dans le second milieu sans s'affaiblir. Si l'un des deux milieux n'était pas du nombre de ceux où la lumière se propage en tous sens, suivant les mêmes lois, ou si l'un d'eux absorbait plus ou moins complétement la lumière, la loi de la réflexion serait toujours vraie, mais la loi de Descartes cesserait de subsister. Toutes les expériences faites jusqu'ici confirment parfaitement les prévisions de l'analyse.

En admettant avec la plupart des physiciens que la couleur dépend généralement de l'épaisseur de l'onde ou de la longueur d'ondulation, la loi d'égalité de la durée des vibrations moléculaires dans les trois ondes incidente, réfléchie et réfractée, trouverait une éclatante confirmation dans ce fait constant, avéré, que la couleur d'un rayon lumineux ne change pas dans l'acte de la réflexion et de la réfraction.

Cette même égalité donne la raison d'une loi générale d'acoustique démontrée par M. Savart à l'aide d'un très grand nombre d'expériences, et que l'on peut énoncer comme il suit : Quelles que soient la nature et les dimensions des corps qui, par communication de mouvement, vibrent simultanément, la durée des vibrations sonores reste la même pour tous ces corps, de sorte que tous vibrent à l'unisson.

21. Si les milieux transparents dans lesquels se font la réflexion et la réfraction du mouvement simple ne sont point isotropes, non seulement l'épaisseur des ondes propagées dans ces milieux dépend de la

direction des plans qui la terminent, ou, ce qui revient au même, de la direction du second plan invariable P″, mais en outre le calcul montre qu'à une direction donnée de ce dernier plan correspondent toujours deux ondes planes qui offrent des épaisseurs, et par suite des vitesses de propagation différentes. Si l'on donne dans ce cas non pas la direction du second plan invariable P″, mais sa trace sur un plan fixe avec le rapport entre le sinus de son inclinaison sur ce plan fixe et l'épaisseur d'une onde plane; à cette trace et à ce rapport correspondront quatre systèmes d'ondes planes et quatre positions du second plan invariable, qui sera pour deux de ces systèmes inclinés inégalement, mais dans le même sens, sur le plan fixe, et pour les deux autres en sens contraire. Si le plan fixe étant une surface réfléchissante, on considère l'une de ces quatre ondes comme incidente, alors des trois autres, deux correspondront à des ondes inclinées sur la surface dans un autre sens que l'onde incidente, et rempliront la condition à laquelle doit satisfaire l'onde réfléchie, savoir : que l'on obtienne le même rapport en divisant le sinus d'incidence par l'épaisseur des ondes incidentes, ou le sinus de réflexion par l'épaisseur des ondes réfléchies. Concevons de même que le plan fixe étant considéré comme une surface réfringente qui sépare le milieu donné d'un autre, on fasse dans cet autre milieu tomber un rayon sur cette surface. Si l'on cherche à déterminer le rayon réfracté par la condition que le rapport entre le sinus de réfraction et l'épaisseur des ondes réfractées soit équivalent au rapport entre le sinus d'incidence et l'épaisseur des ondes incidentes, on trouve que cette condition peut être remplie dans le milieu donné par deux ondes inclinées dans le même sens sur la surface réfringente.

De ces considérations il résulte qu'un mouvement simple, en se réfléchissant ou en se réfractant dans un milieu non isotrope, donne en général naissance à deux ondes réfléchies ou à deux ondes réfractées. Cette conclusion est une nouvelle preuve de la conformité parfaite de la théorie avec l'expérience. On trouve en effet dans la nature un grand nombre de substances justement appelées doublement réfringentes, et qui sont telles qu'un rayon de lumière ne puisse pas y pénétrer ou se réfléchir à leur surface intérieure sans se diviser en deux autres rayons réfractés ou réfléchis.

Lorsque deux milieux doublement réfringents sont séparés l'un de l'autre par une surface plane, on peut imaginer quatre systèmes d'ondes planes propagées dans le premier milieu, et quatre systèmes d'ondes planes propagées dans le second milieu, de telle sorte que le sinus de l'inclinaison d'une onde plane sur la surface de séparation soit toujours à l'épaisseur de cette onde dans un rapport donné.

D'après ce qu'on vient de lire, il est clair que si l'on prend une de ces huit ondes pour onde incidente, deux autres de ces ondes, qui se propageront dans le même milieu que l'onde incidente, représenteront les deux ondes réfléchies; deux autres, qui, seules dans le second milieu, répondront à des ondes planes inclinées sur la surface de séparation dans le même sens que les ondes incidentes, représenteront les ondes réfractées. On déduit immédiatement de cette proposition les règles établies par MM. Biot et Malus pour la détermination des rayons réfléchis par la seconde surface des cristaux à un et à deux axes optiques. Voici, afin qu'on puisse mieux le comparer à la théorie de M. Cauchy, un des énoncés de M. Biot, *Précis de physique*, 3ᵉ éd., p. 263 et suiv. : « Lorsqu'un rayon de lumière tombe sur la première surface d'un cristal en sortant du vide ou de tout autre milieu non cristallisé, il se réfléchit en un seul faisceau, de manière que l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence... Mais il n'en est pas ainsi dans la réflexion intérieure qui s'opère à la seconde surface du cristal : chaque rayon, en se réfléchissant sur cette surface, se divise généralement en deux faisceaux qui reviennent dans le cristal... La direction de la réflexion est la première chose à déterminer... Dans le cas où le cristal a deux axes, aucun des deux rayons ne fait généralement l'angle de réflexion égal à l'angle d'incidence... Mais, dans ce cas, le rayon incident intérieur étant donné, calculez le rayon émergent qui en dériverait, puis transportez ce rayon émergent de l'autre côté de la normale, en lui donnant une égale incidence, et calculez les rayons réfractés qu'il produirait en rentrant dans le cristal suivant cette direction : ce devront être celles des rayons réfléchis intérieurs... Je ne présente cette méthode qu'avec défiance, et il serait à désirer que l'on fît des expériences pour la constater. »

Les expériences manquent encore; mais une théorie simple a donné pour son coup d'essai la démonstration rigoureuse des induc-

tions du profond expérimentateur. La construction de M. Biot repose sur ce principe, que les deux rayons réfléchis sont les rayons réfractés correspondant à un rayon émergent facile à déterminer, et ce principe lui-même est un cas particulier de la loi si féconde de la proportionnalité des sinus aux épaisseurs des ondes.

Modifications que la réflexion et la réfraction font subir au mode de polarisation du rayon, et à l'amplitude des vibrations moléculaires. — Intensité du rayon réfléchi ou réfracté.

22. Après ces détails, qui feront mieux connaître et mieux apprécier la théorie que nous avons promis d'exposer aussi clairement que possible, recherchons avec M. Cauchy comment la réflexion et la réfraction modifient d'une part l'amplitude des vibrations incidentes, d'autre part le mode de polarisation du mouvement simple, particulièrement dans le cas où les deux milieux donnés sont isotropes, et où le premier de ces milieux est transparent.

Le mouvement incident étant par hypothèse un mouvement simple qui se propage dans un milieu isotrope, pourra être censé résulter de la superposition de deux autres rayons qui seraient polarisés en ligne droite, le premier perpendiculairement au plan d'incidence, le second suivant ce même plan. Si l'on prend la normale à la surface réfléchissante pour un des axes coordonnés, et le plan d'incidence pour l'un des plans coordonnés, le premier des rayons composants se trouvera complétement déterminé ou par les déplacements des molécules mesurés dans le plan d'incidence et parallèlement aux axes coordonnés que renferme ce plan, ou par les déplacements absolus des molécules mesurés dans le même plan sur des droites perpendiculaires à la direction de propagation du mouvement; tandis que le second des rayons composants se trouvera déterminé par les déplacements des molécules mesurés perpendiculairement au plan d'incidence, ou, ce qui revient au même, parallèlement au troisième axe. Or, le calcul montre que ces déplacements, mesurés les uns dans le plan d'incidence, les autres perpendiculairement à ce plan, se trouveront séparés dans les équations de condition relatives à la surface réfléchissante, et même après la réflexion et la réfraction, comme ils l'étaient dans le mouvement incident, de sorte que les deux mouvements simples qui, par leur superposition,

reproduisaient le mouvement incident, et qui étaient polarisés, le premier perpendiculairement au plan d'incidence, le second suivant ce même plan, se trouveront réfléchis et réfractés indépendamment l'un de l'autre.

De ce qu'on vient de dire, il résulte que, pour découvrir les lois générales suivant lesquelles un mouvement simple est réfléchi ou réfracté par la surface de séparation de deux milieux isotropes dont le premier est transparent, il suffira de rechercher les lois particulières de la réflexion et de la réfraction d'un mouvement simple polarisé ou perpendiculairement au plan d'incidence, ou suivant ce plan. Alors aussi, dans le mouvement réfléchi et même dans le mouvement réfracté, lorsque le second milieu sera transparent, on pourra se borner à considérer les déplacements absolus des molécules qui seront mesurés pour chaque mouvement dans le plan d'incidence ou perpendiculairement à ce plan, mais toujours sur des droites perpendiculaires à la direction suivant laquelle le mouvement se propage.

23. Désormais dans un mouvement par ondes planes nous nommerons, pour abréger, rayon simple, le mouvement simple formé de l'ensemble des molécules originairement situées sur une droite perpendiculaire aux plans des ondes; l'axe de ce rayon sera la droite même dont il s'agit; nous dirons que le rayon est doué de la polarisation rectiligne, circulaire ou elliptique, suivant que chaque molécule décrira une droite, un cercle ou une ellipse; et quand il s'agira d'un rayon plan ou polarisé rectilignement, il faudra, comme nous l'avons déjà dit, distinguer le plan du rayon, c'est-à-dire le plan qui le renferme, et le plan suivant lequel ce rayon est polarisé ou le plan de polarisation, ce dernier plan étant perpendiculaire au premier et passant comme lui par l'axe du rayon. Les nœuds du rayon seront d'ailleurs à chaque instant les points de l'axe occupés par des molécules qui conserveront ou reprendront leurs positions initiales.

Nous avons appelé phase, suivant le langage adopté par les auteurs qui dans la théorie de la lumière admettent le système des ondulations, l'angle variable $kr - st + \alpha$ dont le cosinus entre comme facteur dans le déplacement d'une molécule mesurée parallèlement à un axe fixe. La partie variable de cette phase $kr - st$ est indépendante de l'axe fixe que l'on considère; mais le paramètre angu-

risation, l'angle aigu formé par ce dernier plan avec le plan fixe. Si d'ailleurs le plan fixe passe, comme on le suppose généralement, par la direction du rayon simple, et si ce rayon est considéré comme résultant de la superposition de deux autres polarisés, l'un suivant le plan fixe, l'autre perpendiculairement à ce plan, l'azimut du rayon résultant et l'azimut de son plan de polarisation seront simplement les deux angles complémentaires l'un de l'autre qui auront pour tangente trigonométrique les rapports direct et inverse des vibrations moléculaires dans les deux rayons composants. Si le rayon simple donné cessait d'être polarisé rectilignement, rien n'empêcherait d'appeler encore azimut de ce rayon l'azimut qu'on obtiendrait dans le cas où, après l'avoir décomposé en deux rayons partiels polarisés, l'un suivant le plan fixe, l'autre perpendiculairement à ce plan, on parviendrait, comme on peut le faire à l'aide de certains procédés que l'on indiquera plus tard, à replacer les nœuds de l'un de ces rayons composants sur les nœuds de l'autre sans changer les amplitudes qui seront inégales, excepté dans le cas de la polarisation circulaire. Ainsi défini, l'azimut d'un rayon simple sera toujours l'angle qui a pour tangente trigonométrique le rapport entre les amplitudes des vibrations moléculaires de deux rayons composants, polarisés l'un suivant le plan fixe, l'autre perpendiculairement à ce plan. Dès lors, quand un rayon résultant sera doué de la polarisation circulaire, son azimut sera toujours de 45°, quelle que soit d'ailleurs la direction du plan fixe auquel il se rapporte.

24. Pour déterminer le rapport suivant lequel la réflexion ou la réfraction font varier le déplacement ou la déviation des molécules dans un mouvement polarisé perpendiculairement au plan d'incidence, ou suivant ce même plan, il faudra recourir aux conditions relatives à la surface de séparation des milieux. Cette méthode nous apprend qu'il suffit de multiplier la déviation d'une molécule considérée comme faisant partie du mouvement incident, par un certain coefficient de réflexion ou de réfraction, pour obtenir la déviation de cette même molécule, considérée comme faisant partie du mouvement réfléchi ou réfracté.

Révélons ici un nouvel artifice de calcul que M. Cauchy a mis en œuvre. Il semblait naturel de n'opérer que sur le déplacement réel ou absolu de la molécule donné comme nous l'avons vu par l'équation.

$$d = Ce^{KR - St} \cos(kr - st + \alpha),$$

et cependant cette marche, si on l'avait suivie, aurait conduit à des calculs longs et pénibles, qui eussent caché aux regards des géomètres un grand nombre de lois générales. M. Cauchy eut bientôt deviné qu'il fallait au contraire employer uniquement le déplacement en partie réel et en partie imaginaire,

$$d = Ce^{KR - St} e^{(kr - st + \alpha)\sqrt{-1}}$$

qu'il a désigné sous le nom de déplacement ou déviation symbolique. L'emploi de ce déplacement conduit à des coefficients de réflexion et de réfraction qui sont eux-mêmes en partie réels, en partie imaginaires, et peuvent être représentés par une nouvelle expression de la forme $Me^{a\sqrt{-1}}$ dans laquelle M et a seront le module et l'argument de réflexion ou de réfraction. Dès lors, comme pour multiplier une expression imaginaire par une autre, il suffit de multiplier le module de la première par le module de la seconde, et d'ajouter à l'argument de la première l'argument de la seconde, on en conclura que dans le passage du mouvement incident au mouvement réfléchi ou réfracté, la déviation symbolique de la molécule deviendra

$$d' = M\,Ce^{KR - St} e^{(kr - st + \alpha + a)\sqrt{-1}}$$

et son déplacement réel

$$d' = M\,Ce^{KR - St} \cos(kr - st + \alpha + a).$$

Si l'on remarque d'ailleurs que dans un mouvement simple polarisé en ligne droite et propagé dans un milieu isotrope qui n'éteint pas le mouvement, augmenter ou diminuer le paramètre angulaire α, c'est déplacer réellement chaque nœud et le transporter en arrière ou en avant de la position qu'il occupait, il sera démontré que lorsqu'on fait tomber sur la surface de séparation de deux milieux isotropes un mouvement simple polarisé perpendiculairement au plan d'incidence ou suivant ce plan, et que le mouvement réfléchi ou réfracté se propage

sans s'affaiblir, la réflexion ou la réfraction du mouvement incident produit en général les deux effets que nous allons énoncer :

1° Tandis que le mouvement incident se transforme en mouvement réfléchi ou en mouvement réfracté, les amplitudes des vibrations moléculaires varient dans un rapport égal au module M de réflexion ou de réfraction ;

2° Chaque nœud, à l'instant où, en vertu de son mouvement de propagation, il atteint la surface de séparation, se trouve déplacé et transporté en arrière ou en avant de la position qu'il occupait à une distance représentée par le rapport $\frac{a}{k}$ de l'argument de réflexion au coefficient $k = \frac{2\pi}{l}$ inversement proportionnel à la longueur d'ondulation, coefficient que M. Cauchy a cru devoir désigner sous le nom de caractéristique du mouvement simple.

Si le mouvement incident était polarisé elliptiquement, ou circulairement, ou rectilignement, mais suivant un plan quelconque, on pourrait le regarder comme résultant de la superposition de deux mouvements polarisés, l'un perpendiculairement au plan d'incidence, l'autre suivant ce même plan, et alors la réflexion ou la réfraction aurait pour effet : 1° de faire varier le rapport entre les amplitudes des vibrations moléculaires dans les deux mouvements composants proportionnellement au rapport entre les modules de réflexion et de réfraction de ces deux mouvements : 2° d'éloigner ou de rapprocher les nœuds de première espèce de l'un, des nœuds de première espèce de l'autre, le déplacement relatif des nœuds de même espèce dans les deux mouvements étant au signe près le rapport entre la différence de leurs arguments de réflexion ou de réfraction et la caractéristique du mouvement simple. Il importe d'observer que ces effets de variations dans l'amplitude des vibrations et la position des nœuds dépendent uniquement de l'angle d'incidence, et restent, ainsi que les coefficients de réfraction ou de réflexion, indépendants de l'amplitude des vibrations moléculaires et de la position des nœuds dans le mouvement incident.

25. Il résulte immédiatement de ce que nous venons de dire que le premier effet de la réflexion ou de la réfraction sur le mouvement incident, est de changer son mode de polarisation, de telle sorte qu'en

faisant varier l'angle d'incidence ou en multipliant les réflexions ou les réfractions, on pourra toujours faire passer un mouvement simple d'un mode de polarisation donné à un autre mode de polarisation quelconque; et, s'il s'agit d'un mouvement polarisé rectilignement, qu'on pourra le transformer en un mouvement polarisé aussi rectilignement, mais dans un plan quelconque.

En général, si après la réflexion ou la réfraction les nœuds de première espèce de l'un des rayons composants coïncident avec les nœuds de première ou de seconde espèce de l'autre, le mouvement résultant sera polarisé en ligne droite, et l'inclinaison de son plan de polarisation sur le plan d'incidence aura pour tangente trigonométrique le rapport entre les amplitudes des vibrations moléculaires dans les deux mouvements polarisés, l'un perpendiculairement au plan d'incidence, l'autre suivant ce plan. De plus, le plan de polarisation du mouvement résultant sera situé d'un côté ou de l'autre du plan d'incidence, suivant que la superposition des mouvements composants fera coïncider les nœuds de première ou de seconde espèce de l'un avec les nœuds de première ou de seconde espèce de l'autre.

Si dans les deux mouvements composants les nœuds sont séparés, le mouvement réfléchi ou réfracté sera polarisé circulairement ou elliptiquement. Il sera polarisé circulairement, comme on l'a déjà vu, si les vibrations moléculaires présentent les mêmes amplitudes dans les deux mouvements composants, et si d'ailleurs les nœuds de l'un se trouvent séparés des nœuds de l'autre par des distances égales au quart de la longueur d'une ondulation. Mais si la séparation des nœuds existe sans que les deux conditions ici énoncées se trouvent remplies, le mouvement réfléchi ou réfracté sera doué de la polarisation elliptique. Au reste, dans ce dernier cas, le calcul montre que le rayon réfléchi ou réfracté pourra toujours être considéré comme résultant de la superposition de deux mouvements simples polarisés en ligne droite, suivant deux plans rectangulaires entre eux et tellement choisis, que les nœuds des deux nouveaux mouvements se trouvent encore séparés par des distances égales au quart de la longueur d'une ondulation : seulement, ces nouveaux mouvements, dont aucun, pour l'ordinaire, ne sera polarisé suivant le plan d'incidence, offriront des vibrations moléculaires dont les amplitudes seront inégales.

26. Les conventions et définitions que nous avons admises, et sans lesquelles il eût été impossible de s'entendre, fournissent le moyen de simplifier les énoncés de plusieurs de ces propositions. Ainsi, en particulier, si un rayon simple, réfléchi ou réfracté par la surface de séparation de deux milieux isotropes se propage sans s'affaiblir, les effets de la réflexion ou de la réfraction pourront s'énoncer comme il suit :

1° La tangente de l'azimut du rayon et la tangente de l'azimut de son plan de polarisation varieront proportionnellement aux rapports direct et inverse entre les modules de réflexion ou de réfraction des deux rayons composants polarisés, l'un suivant le plan d'incidence, l'autre perpendiculairement à ce plan ;

2° La différence des phases ou l'anomalie sera augmentée d'une quantité égale, au signe près, à la différence entre leurs arguments de réflexion ou de réfraction.

Supposons, pour fixer les idées, que le rayon incident soit polarisé à 45° du plan d'incidence, de telle sorte qu'en prenant le plan d'incidence pour plan fixe, son azimut soit de 45° ; la tangente et la cotangente de cet azimut seront égales à l'unité, et par conséquent, dans ce cas, l'azimut du rayon réfléchi ou réfracté, et l'azimut de son plan de polarisation, auront pour tangente le rapport direct et le rapport inverse des modules de réflexion ou de réfraction correspondant à deux rayons incidents qui seraient polarisés, l'un suivant le plan d'incidence, l'autre perpendiculairement à ce plan. De plus, comme on peut supposer que la différence des phases ou l'anomalie du rayon incident soit réduite à 0, il en résultera que, pour un rayon polarisé à 45° du plan d'incidence, l'anomalie ou la différence de phase du rayon réfléchi ou réfracté est égale, au signe près, à la différence entre les arguments des deux rayons polarisés, l'un suivant le plan d'incidence, l'autre perpendiculairement à ce plan. Si l'on nomme avec M. Cauchy anomalie et azimut de réflexion ou de réfraction l'anomalie et l'azimut relatifs à un rayon polarisé à 45° du plan d'incidence, on arrivera aux propositions suivantes : 1° la tangente de l'azimut d'un rayon réfléchi ou réfracté est le produit que l'on obtient quand on multiplie la tangente de l'azimut du rayon incident par la tangente de l'azimut de réflexion ou de réfraction ; 2° l'anomalie ou la différence de phase du rayon réfléchi ou réfracté, est la somme qu'on obtient quand on

ajoute à l'anomalie du rayon incident l'anomalie de réflexion ou de réfraction.

Appelons Zi et Zr les azimuts, Ni et Nr les anomalies du rayon incident et du rayon réfléchi ou réfracté ; Z l'azimut et N l'anomalie de réflexion ou de réfraction ; on aura :

$$\text{tang Zr} = \text{tang Zi tang Z} ; \text{N r} = \text{N i} + \text{N}.$$

27. Il est maintenant facile de prévoir ce qui arrivera si un rayon simple, après avoir été réfléchi ou réfracté plusieurs fois de suite par des surfaces dont chacune sépare l'un de l'autre deux milieux isotropes, se propage sans s'affaiblir. Concevons d'abord que les divers plans de réflexion ou de réfraction coïncident avec le premier plan d'incidence, c'est-à-dire que le rayon est toujours réfléchi ou réfracté dans le même plan ; alors à chaque réflexion ou réfraction, la tangente de l'azimut du rayon déjà obtenu variera proportionnellement à la tangente de l'azimut de réflexion ou de réfraction, tandis que l'anomalie de réflexion ou de réfraction viendra s'ajouter à l'anomalie de ce même rayon. Donc, en définitive, l'azimut du dernier rayon réfléchi ou réfracté aura pour tangente trigonométrique le produit que l'on obtient en multipliant la tangente de l'azimut du rayon incident par les tangentes de tous les azimuts de réflexion ou de réfraction. D'autre part, l'anomalie, ou la différence de phase du rayon réfléchi ou réfracté, sera la somme que l'on obtient en ajoutant à l'anomalie du rayon incident toutes les anomalies de réflexion ou de réfraction.

Si l'on désigne par Zi, Zr les azimuts, par Ni, Nr les anomalies du rayon incident et du rayon réfléchi ou réfracté ; par Z, Z', Z''... les azimuts, par N, N', N''... les anomalies de réflexion de réfraction, on aura :

$$\text{tang Zr} = \text{tang Zi tang Z tang Z'}...$$
$$\text{Nr} = \text{Ni} + \text{N} + \text{N'} + \text{N''}.....$$

Si le rayon simple donné est plusieurs fois réfléchi ou réfracté sous la même incidence, il y aura égalité entre les divers azimuts de réflexion ou de réfraction ; donc alors les valeurs successivement acquises par la tangente de l'azimut du rayon formeront une progression géométrique, tandis que les valeurs successivement acquises

par son anomalie formeront une progression arithmétique. On a en effet, dans l'hypothèse admise, $Z = Z' = Z'' \dots$; $N = N' = N'' \dots$, et en appelant n le nombre des réflexions ou des réfractions :

$$\text{tang } Zr = \text{tang } Zi \text{ tang}^n Z;\ Nr = Ni + n N.$$

Enfin, si le rayon incident est un rayon plan et polarisé à 45° du plan d'incidence, la progression arithmétique aura 0 pour premier terme, tandis que la progression géométrique aura pour premier terme l'unité, de sorte que les anomalies des divers rayons seront proportionnelles aux logarithmes de tangentes des azimuts correspondants, et pourront même leur devenir égales si l'on choisit convenablement la base du système de logarithmes.

28. Lorsque la somme des anomalies de réflexion ou de réfraction sera, au signe près, un multiple de la demi-circonférence, ou lorsque l'on aura $N + N' + N'' \dots = \pm m\,\pi$, et par suite $Nr = Ni \pm m\,\pi$, le rayon incident et le dernier rayon réfléchi ou réfracté pourront être censés offrir la même anomalie, ou deux anomalies dont la différence sera le nombre π, suivant que le multiple en question sera le produit de la demi-circonférence par un nombre pair ou par un nombre impair. Dans les deux cas, si le rayon incident est polarisé en ligne droite, on pourra en dire autant du rayon réfléchi ou réfracté. Tel sera en particulier l'effet de plusieurs réflexions ou de plusieurs réfractions effectuées sous la même incidence, si cette incidence est telle que le rapport de l'anomalie du rayon incident à l'anomalie de réflexion ou de réfraction se trouve représenté par une quantité de la forme $\frac{m\,\pi}{n}$, m et n étant des nombres entiers, et si d'ailleurs le nombre des réflexions ou des réfractions successives est égal à n ou à un multiple de n, alors le plan de polarisation du dernier rayon réfléchi ou réfracté se trouvera situé par rapport au plan d'incidence, du même côté que le plan de polarisation du rayon incident ou du côté opposé, suivant que le nombre des réflexions sera équivalent à l'un des nombres 2 n, 4 n, 6 n, etc..., ou à l'un des nombres n, 3 n, 5 n, etc.

Lorsque le rayon incident étant polarisé rectilignement et réfléchi ou réfracté plusieurs fois de suite, la somme $N + N' + N'' \dots$ des anomalies de réflexion ou de réfraction surpasse d'un angle droit

un multiple du nombre π, ou est égal à $\frac{\pi}{2} + m\pi$, l'anomalie du rayon réfléchi ou réfracté devient $\frac{\pi}{2} + (m + 1)\pi$ et peut être réduite à $-\frac{1}{2}\pi$ ou à $+\frac{1}{2}\pi$, et par conséquent à celle d'un rayon polarisé circulairement. Mais alors, pour que le dernier rayon réfléchi ou réfracté offre effectivement la polarisation circulaire, il est nécessaire encore que les amplitudes des vibrations moléculaires dans les deux rayons composants soient égales, ou que l'azimut du rayon résultant étant égal à 45°, la tangente de cet azimut devienne égale à 1. C'est ce qui arrivera si, en faisant tourner le rayon incident sur lui-même, on amène son plan de polarisation dans une position telle que la cotangente de l'azimut d'incidence soit égale au produit des tangentes de tous les azimuts de réflexion ou de réfraction. Si l'on a en effet :

$$\text{Cot } Zi = \frac{1}{\text{tang } Zi} = \text{tang } Z \text{ tang } Z' \ldots$$

on aura :

$$\text{Tang } Zr = \text{tang } Zi \text{ tan } Z \text{ tang } Z' \ldots = 1.$$

D'après cette règle, si chaque azimut de réflexion ou de réfraction se réduit à 45°, on aura :

$$\text{Tang } Z = \text{tang } Z' = \ldots = \text{tang } 45° = 1.$$

On devra par conséquent avoir aussi tang Zi $= 1$, c'est-à-dire que le rayon incident devra être polarisé à 45°.

On peut observer encore que toute série de réflexions et de réfractions propre à transformer un rayon plan en un rayon polarisé circulairement ou du moins en un rayon dont l'anomalie puisse être réduite à $-\frac{1}{2}\pi$ ou à $+\frac{1}{2}\pi$ transformera au contraire un rayon incident dont l'anomalie serait $-\frac{1}{2}\pi$ ou $+\frac{1}{2}\pi$ en un rayon plan ou polarisé rectilignement, car cette série de réflexion ou de réfraction ne peut transformer un rayon plan en un rayon dont l'anomalie

soit $+\frac{\pi}{2}$ qu'autant que l'on aura $N + N' + N''... = \frac{(2m+1)\pi}{2}$; mais $\frac{(2m+1)\pi}{2} + \frac{\pi}{2} = m'\pi$; donc réciproquement un rayon dont l'anomalie serait $+\frac{\pi}{2}$ sera transformé par cette même série de réflexions ou de réfractions en un rayon plan. On démontrerait de la même manière que toute série de réflexion ou de réfraction propre à transformer un rayon plan en un rayon dont l'anomalie serait un angle donné, transformera au contraire un rayon incident dont l'anomalie serait ou cet angle pris en signe contraire, ou le supplément de cet angle, en un rayon doué de la polarisation rectiligne ; car si l'on a

$$Ni = m\pi,\ Nr = m\pi + N + N' + N''... = \alpha,$$

on aura :

$$-\alpha + N + N' + N''... = m'\pi.$$
$$\pi - \alpha + N + N' + N''... = m''\pi, \text{ etc.}$$

D'ailleurs l'azimut du rayon plan dans lequel se transforme ainsi le rayon dont l'anomalie était $-\alpha$ ou $\pi - \alpha$ sera le même que celui du rayon incident, si chaque azimut de réflexion ou de réfraction est de 45°.

Enfin, lorsque chaque azimut de réflexion ou de réfraction est, non pas égal, mais supérieur ou inférieur à l'unité, si le nombre des réflexions ou des réfractions devient de plus en plus considérable, les azimuts des rayons successivement obtenus croîtront ou décroîtront sans cesse indéfiniment, de sorte qu'après un grand nombre de réflexions ou de réfractions, le dernier rayon réfléchi ou réfracté sera sensiblement polarisé dans le plan d'incidence ou perpendiculairement à ce plan, comme le prouve l'expérience.

29. Nous avons insisté sur ces considérations et nous avons énuméré avec détail ces lois générales, parce qu'elles donnent l'explication d'un très grand nombre de faits. L'étude de cette partie de notre analyse causera quelque fatigue à nos lecteurs ; mais cette fatigue nous ne pouvions la leur épargner : aucune autre route n'aurait pu les conduire à une connaissance approfondie du système des ondulations. La difficulté n'est au reste qu'apparente, car M. Cauchy, par la précision de ses définitions et l'élégance de sa méthode, a

répandu sur cette partie délicate et obscure de la théorie une clarté vraiment inattendue.

Nous avons supposé dans tout ce qui précède que les différents plans de réflexion ou de réfraction se confondaient avec le plan d'incidence ; il faudrait maintenant passer au cas général, et pour être en état de calculer ce qui arrive alors, il faudrait rechercher quelles variations subissent l'anomalie ou l'azimut d'un rayon simple, quand le plan à partir duquel se comptait l'azimut vient à tourner. Mais avant d'entrer dans cette discussion nous avons contracté l'obligation de montrer avec quelle facilité les diverses propositions qui précèdent s'appliquent à la théorie de la lumière, et comment elles s'accordent avec les formules connues et avec les expériences des physiciens, particulièrement avec les formules et les expériences de Fresnel et de M. Brewster, relatives à la réflexion et à la réfraction opérées par la surface de séparation de deux milieux isophanes, transparents ou opaques.

30. Celles des lois de la réfraction ou de la réflexion qui dépendent, comme nous venons de le voir, de la forme des équations de condition relatives à la surface de séparation des deux milieux, et se rapportent aux changements éprouvés par les amplitudes des vibrations moléculaires et les phases des rayons, sont exprimées par des équations finies qui renferment deux constantes correspondantes à chaque milieu. La première de ces constantes est celle qu'on a appelée jusqu'ici indice de réfraction, mais qu'il faudrait désigner exclusivement avec M. Arago sous le nom plus significatif d'équivalent optique, parce qu'elle exprime en réalité quelle est l'épaisseur du milieu donné, qui, relativement à son action sur le mouvement qui s'y propage, équivaut à une épaisseur égale à l'unité prise dans le milieu auquel on convient de comparer tous les autres. Lorsque la seconde de ces constantes se réduit, au signe près, à l'unité, un rayon polarisé rectilignement suivant un plan quelconque peut tomber sur la surface réfléchissante sous une incidence telle qu'il se trouve après la réflexion complétement polarisé dans le plan d'incidence. L'angle d'incidence pour lequel cette condition est remplie, ou ce qu'on nomme l'angle de polarisation complète, a précisément pour tangente trigonométrique l'indice de réfraction ; c'est-à-dire que l'angle de polarisation totale, quand il existe, est celui pour lequel les

rayons incident et réfracté se coupent à angle droit. Mais il en est autrement quand la deuxième constante ne se réduit pas, au signe près, à l'unité ; alors on voit disparaître l'angle de polarisation complète, en sorte qu'il n'existe plus d'incidence pour laquelle un rayon simple soit complétement polarisé par réflexion dans le plan d'incidence, quel que soit d'ailleurs l'azimut primitif de ce rayon, c'est-à-dire l'angle formé avec le plan d'incidence par le plan qui le renferme. Le calcul prouve encore qu'un rayon polarisé dans le plan d'incidence est incapable de réflexion sous un certain angle, c'est-à-dire sous l'angle de polarisation dans un plan perpendiculaire à ce même plan d'incidence.

31. Ainsi, d'après l'analyse rigoureuse de M. Cauchy, il faut partager les milieux où le mouvement se propage sans s'affaiblir en deux grandes classes, suivant qu'ils peuvent polariser complétement ou incomplétement le mouvement incident. Cette distinction est-elle seulement une abstraction mathématique, ou bien existe-t-elle réellement dans la nature? Elle existe sans aucun doute ; car, s'il s'agit par exemple de la lumière, un grand nombre de surfaces réfléchissantes, le verre, l'obsidienne, etc., polarisent complétement la lumière homogène qui tombe sur elles sous des angles convenables, tandis que les substances métalliques et les milieux très réfringents, comme le diamant, ne possèdent cette propriété que d'une manière imparfaite, le rayon réfléchi ne disparaissant jamais entièrement. Pour la lumière aussi, la tangente de l'angle de polarisation complète, relatif à un milieu quelconque, est toujours égale à l'indice de réfraction de ce milieu, et cette belle loi fut découverte expérimentalement par M. Brewster, avant qu'elle eût été même soupçonnée par l'analyse. Il y parvint en comparant entre elles un grand nombre de substances de toute espèce ; ainsi, par exemple, les indices de réfraction de l'eau et du crown-glass ont pour valeurs respectives 1,336, 1,535, et ces valeurs sont réellement les tangentes des angles de polarisation, qui sont pour le verre de 53° 11′, pour le crown-glass de 68° 6′. Pour la lumière encore, comme pour le mouvement simple dont il a été question plus haut, un rayon polarisé dans un certain plan n'est jamais susceptible d'être réfléchi par la surface du milieu sous l'angle de polarisation propre à ce milieu dans un plan perpendiculaire au plan de polarisation.

D'ailleurs la polarisation de la lumière n'est réellement complète que lorsque la lumière est homogène ou d'une couleur déterminée; ce qu'on aurait pu prévoir *à priori*, car alors seulement le rayon lumineux peut être comparé aux mouvements simples que nous avons étudiés jusqu'ici.

Partout où l'analyse nous montre un mouvement simple polarisé rectilignement et qui ne se réfléchit pas sous une certaine incidence dans un plan perpendiculaire à son plan de polarisation, l'expérience nous montre un rayon lumineux jouissant de propriétés analogues nous sommes donc forcé de conclure que ce rayon lumineux a réellement la constitution du mouvement simple défini n° 3, et que par conséquent la lumière polarisée rectilignement est le résultat de vibrations transversales propagées dans l'éther. Je ne vois pas ce qu'on pourrait répondre à cet argument de M. Cauchy: « Que les lois de la polarisation rectiligne auxquelles je parviens, soient rigoureusement déduites des équations des mouvements infiniment petits, c'est ce dont chacun pourra aisément s'assurer en exécutant les calculs qui sont assez simples; que les lois obtenues soient précisément celles de la polarisation de la lumière, on n'en saurait douter; la lumière est donc une espèce particulière de mouvement infiniment petit, transversal, ou qui s'exécute sans changement de densité; et le système des ondulations est un fait démontré. »

32. On déduit encore des principes exposés dans les numéros précédents l'explication complète de la réflexion totale.

Si l'indice de réfraction est inférieur à l'unité, à linstant où l'angle d'incidence, venant à croître offrira un sinus égal à l'indice de réfraction, le rayon réfracté rasera la surface réfléchissante. Si, l'angle d'incidence croissant encore, son sinus devient supérieur à l'indice de réfraction, le rayon réfracté disparaîtra, ou plutôt il s'éteindra en pénétrant à une petite profondeur dans le second milieu, qui, transparent sous des incidences moindres, remplira les fonctions d'un corps opaque. L'on obtiendra ainsi ce qu'on appelle le phénomène de la réflexion totale, l'angle de réflexion totale n'étant autre chose que celui qui a pour sinus l'indice de réfraction. La réflexion totale s'observe toutes les fois qu'un rayon propagé dans l'air, après avoir traversé la première surface du verre ou d'un

cristal, tombe sur la seconde surface de manière à former avec la normale un angle supérieur à celui que nous venons d'indiquer. Voici d'ailleurs les lois que la théorie assigne à ce curieux phénomène.

1° Dans toute réflexion totale opérée par la surface intérieure d'un milieu, l'azimut de réflexion se réduit à l'unité, et par conséquent le rayon incident et le rayon réfléchi offrent toujours le même azimut, quand l'angle d'incidence surpasse l'angle de réflexion totale.

2° A l'aide d'une ou de plusieurs réflexions totales, on peut amener le rayon réfléchi à être polarisé circulairement. Ainsi, par exemple, en employant le verre ordinaire dont l'indice de réfraction est de 1,5, deux réflexions totales sous un angle de 52° devront suffire pour communiquer la polarisation circulaire à un rayon polarisé d'abord rectilignement à 45° du plan d'incidence; après 4 réflexions sous le même angle, le rayon réfléchi serait donc de nouveau polarisé rectilignement à 45° du plan d'incidence, mais de l'autre côté de ce plan; 8 réflexions ramèneraient le plan de polarisation du même côté. Si le rayon incident était polarisé, non plus à 45° du plan d'incidence, mais dans un plan quelconque, 4 réflexions totales sous un angle de 52° offriraient encore un rayon réfléchi semblable au rayon incident, et les plans de polarisation extrême, incident et réfléchi, formeraient encore des angles égaux avec le plan d'incidence, mais seraient situés de deux côtés différents par rapport à ce dernier. Au reste on pourrait produire le même effet avec 5, 6 réflexions totales en changeant la valeur de l'angle d'incidence, et l'on pourrait pareillement obtenir la polarisation circulaire à l'aide de 3, 4 réflexions totales sous la même incidence. Si, pour fixer les idées, on veut produire la polarisation circulaire à l'aide de 3 réflexions totales sous la même incidence, il faudra, si on emploie le verre, que l'angle i d'incidence ait l'une des valeurs suivantes :

$$i = 42^\circ\, 24', \text{ ou } i = 69^\circ\, 21'\, 40''.$$

Or tous ces résultats sont parfaitement conformes aux calculs et aux expériences de Fresnel, qui a prouvé en effet expérimentalement que 3 réflexions totales, sous l'angle de 69°, communiquaient la polarisation circulaire à un rayon polarisé d'abord rectilignement à 45° du plan d'incidence. M. Cauchy trouve encore

que pour obtenir après une seule réflexion la polarisation circulaire, il faut employer un corps dont l'indice de réfraction soit égal ou supérieur à celui du diamant, ou à 4,142. Si l'indice de réfraction a précisément cette dernière valeur, une seule réflexion totale sous l'angle de 32° 46′ produira la polarisation circulaire, pourvu que l'on suppose toujours le rayon incident polarisé à 45° du plan d'incidence; il est à désirer que la vérité de ces derniers résultats soit bientôt constatée par l'expérience.

33. En désignant par Ai, Ar, Aρ, les déplacements ou les amplitudes maxima des molécules de l'éther dans les rayons incident, réfléchi et réfracté; par i, r, ρ, les angles d'incidence, de réflexion ou de réfraction; par Zi, Zr, Zρ, les azimuts des plans de polarisation des rayons incident, réfléchi et réfracté; par e, l'indice de réfraction ou l'équivalent du milieu dont il s'agit, déterminé par l'équation $e = \frac{\sin i}{\sin \rho}$, M. Cauchy prouve que ces diverses quantités sont liées entre elles par les équations

$$(1)\quad A_r^2 = \left\{ \frac{\sin^2 (i-\rho)}{\sin^2 (i+\rho)} \cos^2 Zi + \frac{\text{tang}^2 (i-\rho)}{\text{tang}^2 (i+\rho)} \sin^2 Zi \right\} A_i^2.$$

$$(2)\qquad \text{tang}\, Zr = \frac{\cos (i+\rho)}{\cos (i-\rho)} \text{tang}\, Zi.$$

$$(3)\quad A_\rho^2 = \frac{\sin^2 2i}{e^2 \sin (i+\rho)} \left\{ \cos^2 Zi + \frac{\sin^2 Zi}{\cos (i-\rho)} \right\} A_i^2.$$

$$(4)\qquad \text{tang}\, Z\rho = \frac{1}{\cos (i-\rho)} \text{tang}\, Zi.$$

Pour mieux interpréter les formules qui précèdent et pouvoir les vérifier par l'expérience, il est important d'observer que les amplitudes maxima Ai, Ar, Aρ, etc., des molécules de l'éther dans les rayons incident, réfléchi et réfracté, sont liées intimement avec les intensités de la lumière dans ces trois rayons. Le carré de l'amplitude maximum qui mesure la force vive du mouvement correspondant est proportionnel à l'intensité de la lumière dans le rayon auquel ce mouvement donne naissance, de sorte que dans un même milieu d'une densité donnée, on peut prendre les carrés des amplitudes maxima pour mesurer les intensités de la lumière. Si l'on voulait comparer entre elles les intensités de lumière de deux rayons propagés dans les deux milieux différents, du rayon incident par

exemple, et du rayon réfracté, il faudrait multiplier les carrés des amplitudes par les portions de masse des deux milieux auxquelles le mouvement se communique dans le même temps. Soient m_1, et m_2, ces portions de masse; les intensités de lumière des rayons incident et réfracté seront données par les produits $m_1 A_i^2$, $m_2 A_\rho^2$; on prouvera d'ailleurs facilement que les masses m_1, m_2, sont proportionnelles aux produits $2 \sin i \cos i = \sin 2i$, $2 \sin \rho \cos \rho = \sin 2\rho$; et en appelant Ii, $I\rho$, les intensités des rayons réfléchi et réfracté, on aura :

$$Ii = A_i^2 \sin 2i,\ I\rho = A_\rho \sin 2\rho,\ \frac{I\rho}{Ii} = \frac{A_\rho^2}{A_i^2}\frac{\sin 2\rho}{\sin 2i};$$

ou, en prenant pour unité d'amplitude et pour unité d'intensité l'amplitude et l'intensité relatives au rayon incident $I\rho = A_\rho^2 \frac{\sin 2\rho}{\sin 2i}$. Dans la pratique, comme on ne compare jamais que les intensités de lumière de deux rayons propagés finalement dans l'air, les carrés des amplitudes définitives de ces rayons mesureront toujours leur intensité.

Cette digression sur la mesure des intensités de la lumière était absolument nécessaire et servira de réponse à une objection de M. Newman, qui, dans les *Annalen der Phys. und Chemie*, a reproché à M. Cauchy de ne pas tenir compte du rapport des masses $\frac{m_2}{m_1} = \frac{\sin 2\rho}{\sin 2i}$. Si l'on se plaçait réellement dans le second milieu, et si, placé dans ce second milieu, on voulait observer l'intensité de la lumière réfractée, il faudrait sans aucun doute, et comme l'a très bien observé Fresnel, multiplier le carré A_ρ^2 de l'amplitude par le rapport $\frac{\sin 2\rho}{\sin 2i}$; mais puisque de fait l'œil est toujours plongé dans le même milieu, c'est-à-dire dans l'air, on ne devra avoir égard qu'à l'amplitude initiale du rayon et à son amplitude définitive; et ceci explique pourquoi MM. Cauchy et Newman arrivaient en dernier résultat aux mêmes formules, le produit de tous les facteurs semblables à $\frac{\sin 2\rho}{\sin 2i}$ étant finalement égal à l'unité. En effet, quand le rayon passe une première fois de l'air dans le second milieu, l'intensité devient $A_\rho \frac{\sin 2\rho}{\sin 2i}$; mais si le rayon rentre

dans l'air, cette densité sera nécessairement, en désignant par A' l'amplitude maximum définitive, $A'^2 \frac{\sin 2\rho}{\sin 2i} \times \frac{\sin 2i}{\sin 2\rho} = A'^2$, et par conséquent l'intensité de lumière du rayon sera mesurée en dernier ressort par le carré de l'amplitude définitive.

34. Cela posé, les formules (1) et (2) coïncident avec celles qu'a données Fresnel, pour déterminer l'intensité de la lumière réfléchie, ainsi que le mouvement de son plan de polarisation, et la formule (4) avec celle qu'a donnée M. Brewster pour déterminer le mouvement du plan de polarisation de la lumière réfractée. La discussion de ces formules conduit à une multitude de résultats importants. Ainsi, 1° dans le fluide éthéré, les vibrations perpendiculaires au plan d'incidence sont transformées par la réflexion en d'autres vibrations de même espèce, mais dirigées en sens contraire, dans le cas où le second milieu est plus réfringent que le premier, tandis que les vibrations parallèles au plan d'incidence sont transformées en d'autres vibrations dirigées au moment où la réflexion s'opère tantôt dans le même sens, tantôt en sens contraire, suivant que la somme des angles d'incidence et de réfraction est inférieure ou supérieure à un angle droit. Quand cette somme devient précisément égale à un droit, c'est-à-dire lorsque le rayon incident est perpendiculaire au rayon réfracté, les vibrations dans le rayon réfléchi sont toujours perpendiculaires au plan d'incidence, ou, en d'autres termes, la lumière réfléchie est tout entière polarisée dans ce plan.

2° L'intensité de la lumière réfléchie atteint son maximum lorsque le produit $\cos i \cos \rho$ s'évanouit, c'est-à-dire lorsqu'un des angles i, ρ, devient droit; alors on a $A\rho = Ai$, tang Zr = tang Zi. La lumière réfléchie a la même intensité que la lumière incidente, et se trouve polarisée dans le même plan. On dit pour cette raison qu'il y a réflexion totale. Cela peut d'ailleurs arriver de deux manières : premièrement, quand le second milieu étant plus réfringent que le premier, le rayon incident forme un angle infiniment petit avec la surface de séparation des deux milieux; secondement, quand le second milieu étant moins réfringent que le premier, la même surface forme un angle infiniment petit, non plus avec le rayon incident, mais avec le rayon réfracté. Nous avions déjà énoncé ces conséquences de l'analyse, mais il n'aura pas été inutile d'indiquer comment elles

se déduisent immédiatement des formules fondamentales obtenues ci-dessus.

Deux de ces formules, celles de Fresnel et de M. Brewster, ont déjà été vérifiées par l'expérience, et se sont trouvées conformes à toutes les observations connues. La troisième, qui donne l'intensité de la lumière réfractée, et dont la comparaison directe avec l'expérience reste encore à faire, est vérifiée à son tour, comme nous le montrerons plus en détail, par le phénomène des anneaux colorés. On sait que les anneaux colorés, vus par réflexion, sont groupés autour d'une tache centrale qui est noire, si la lame mince en expérience est comprise entre deux substances d'un pouvoir réfringent supérieur ou inférieur au sien ; blanche, si la lame mince est comprise entre deux substances ayant, l'une un pouvoir réfringent supérieur, l'autre un pouvoir réfringent inférieur au sien ; or, ce résultat curieux de l'expérience, absolument inexplicable dans le système de l'émission, n'est qu'une conséquence très simple de la formule (3), et se déduit immédiatement de la valeur assignée par cette formule à l'intensité de la lumière réfractée. Cette formule s'accorde encore avec la loi de l'égalité de lumière entre les intensités des anneaux réfléchis et transmis, que M. Arago a découverte et mise en évidence par cette expérience si simple et si ingénieuse, qui montre tout à la fois et l'égalité mathématique, et l'égalité d'intensité, et l'état complémentaire des anneaux correspondants réfléchis et transmis.

3° On conclut encore de ces formules que l'intensité de la lumière réfractée atteint son maximum lorsque le produit sin i cos ρ s'évanouit. Cela peut arriver de deux manières, savoir : 1° lorsque le second milieu étant plus réfringent que le premier, on a $i = o$; 2° lorsque le second milieu étant moins réfringent que le premier, on a $\rho = \frac{\pi}{2}$; dans le premier cas, les équations (3) et (4) se réduisent aux formules connues

$$A_\rho^2 = \frac{2}{(e+1)^2} A_i^2, \quad \text{tang } Z\rho = \text{tang } Zi,$$

dont la première, donnée d'abord par M. Young, a été déduite plus tard, par M. Poisson, d'un calcul très élégant. Dans ce cas, le rayon

incident est perpendiculaire à la surface de séparation des deux milieux, et la lumière réfractée est polarisée dans le même plan que la lumière incidente, mais elle a une intensité moindre puisque e surpasse l'unité.

Dans le second cas, on trouve :

$$A_\rho^2 = 4\left(\cos^2 i + \frac{\sin^2 i}{e^2}\right) A_i^2, \ \tang Z_\rho = \frac{\tang i}{\sin \rho}.$$

Alors, le rayon incident rencontre la surface de séparation des deux milieux sous l'angle de réflexion totale; la lumière réfractée n'est plus polarisée dans le même plan que la lumière incidente, et son intensité, divisée par celle de la lumière incidente, donne pour quotient un nombre renfermé entre les deux limites 4 et $\frac{4}{e^2}$ dont la seconde surpasse la première, puisque $e < 1$. Ce nombre atteint sa limite inférieure 4, ou la limite supérieure à $\frac{4}{e^2}$ suivant que la lumière incidente est polarisée dans le plan d'incidence ou perpendiculairement à ce plan. La moyenne entre ces deux limites ou le produit $\frac{2}{e^2}(1+e^2)=2(1+\frac{1}{e^2})$ exprime les rapports des intensités de la lumière réfractée et de la lumière incidente, lorsque cette dernière est de la lumière naturelle.

35. Pour des valeurs de i très voisines de l'angle de réflexion totale, c'est-à-dire lorsque le rayon incident ou réfracté devient sensiblement parallèle à la surface de séparation de deux milieux, la lumière réfléchie est entièrement semblable à la lumière incidente et offre sensiblement la même intensité. Il semblerait que dans le même cas l'intensité de la lumière réfractée devrait toujours être sensiblement nulle et que cette intensité devrait s'affaiblir par degrés, tandis que i s'approcherait indéfiniment de l'angle de réflexion totale. C'est effectivement ce qui arrive lorsque le second milieu est plus réfringent que le premier; mais si le second milieu est moins réfringent que le premier, par exemple si la lumière passe du verre ou du diamant dans l'air ou dans le vide, alors dans le voisinage de la réflexion totale, on obtiendra non seulement une lumière réfléchie qui sera sensiblement égale en intensité à la lu-

mière incidente, mais encore une lumière réfractée dont l'intensité sera mesurée par le carré de l'amplitude et sera quatre fois plus considérable. Le rapport des intensités de la lumière réfractée et de la lumière incidente pourra même, si les vibrations des molécules éthérées sont parallèles au plan d'incidence, atteindre la limite $\frac{4}{e^2}$ et par conséquent les nombres 9, 30, ou même 35, si la lumière sort du verre ordinaire, du diamant, ou d'une substance aussi réfringente que le chromate de plomb, pour passer dans l'air ou dans le vide.

36. La prodigieuse multiplication de lumière dont il est ici question suppose que l'on compare, par exemple, le rayon émergent d'un cristal à celui qui traverse le même cristal. Si le cristal étant terminé par deux faces planes, la lumière les traversait l'une après l'autre, on devrait distinguer trois rayons, savoir : le rayon incident, le rayon réfracté et le rayon émergent. Le calcul prouve : 1° que lorsque les deux faces d'un cristal sont parallèles, l'intensité de la lumière émergente a pour limite supérieure l'intensité de la lumière incidente, et n'atteint cette limite que dans le cas où il n'y a plus de lumière réfléchie ; 2° que quand deux faces non parallèles d'un cristal sont traversées par un rayon de lumière d'abord incident, puis réfracté, puis émergent, le rayon émergent s'éteindra toujours lorsque le rayon incident formera un angle infiniment petit avec la face d'entrée de manière à éprouver sur cette surface une réflexion totale, mais qu'au contraire si ce rayon réfracté rencontre la face de sortie à très peu près sous l'angle de réflexion totale et de manière que le rayon émergent forme un angle infiniment petit avec le plan de cette face, le dernier rayon loin de s'éteindre pourra, dans certains cas, acquérir une très grande intensité. M. Cauchy communiqua cette conséquence de ces formules à M. Kessler, professeur de physique à Prague, et lui proposa de la vérifier par l'observation. Il colla du papier noir sur les triangles rectangles qui servaient de base à un prisme de verre et sur les deux plus petites des trois faces latérales, après avoir percé d'un trou d'épingle le papier qui devait recouvrir une des surfaces latérales, et l'on reconnut que l'image d'une bougie était transmise à travers le prisme avec une grande intensité, dans le cas même où le rayon émergent devenait

sensiblement parallèle à la face de sortie. Il y a donc réellement une prodigieuse multiplication de lumière au moment où l'angle d'incidence est sur le point de devenir égal à l'angle de réflexion totale. Cela ne signifie pas du tout, comme l'a cru M. Newman, que la somme des forces vives dans les ondes réfléchies et réfractées n'est pas égale à la somme des forces vives dans le rayon incident, ce qui serait contraire au principe général de la conservation des forces vives, et inadmissible. Non, ce principe a toujours lieu; mais parce que dans le rayon émergent le mouvement qui produit la lumière est concentré dans un très petit espace ou onglet, l'intensité de la lumière de ce rayon mesurée par le carré de l'amplitude est très grande, tandis que le produit du carré de cette amplitude par la masse du petit onglet reste une quantité très petite qui, ajoutée à la somme des forces vives dans le rayon réfléchi, reproduit exactement la somme des forces vives de l'onde incidente.

37. Remarquons, en finissant, que ces diverses formules de M. Cauchy sont déduites rigoureusement d'une analyse générale, et ne s'appuient sur aucune hypothèse particulière. MM. Fresnel, Newmann, Mac-Cullagh, Kellan, Lubbock, etc., avaient essayé tour à tour de donner la démonstration de ces mêmes formules, mais ils n'y étaient arrivés qu'à l'aide d'hypothèses plus ou moins invraisemblables, plus ou moins contradictoires. Ainsi Fresnel supposait que la densité de l'éther variait d'un milieu à l'autre, tandis que l'élasticité restait la même. M. Newmann au contraire voulait que la densité restât la même, mais que l'élasticité fût différente, et de plus que le plan de polarisation fût parallèle à la direction des vibrations moléculaires; et, chose étrange, Fresnel et M. Newmann arrivaient aux mêmes formules. Ce n'était pas encore assez de l'admission de ces hypothèses; on ne pouvait achever le calcul qu'à l'aide de raisonnements, d'analogies qui constituaient plutôt des probabilités que des preuves; il fallait comparer les molécules de l'éther à des billes, et la réflexion de la lumière à la réflexion des corps élastiques. Dans cette manière de voir, la réfraction de la lumière devenait presque inabordable; ce qui explique pourquoi Fresnel, si ingénieux et si patient, n'a pas même indiqué la formule qui donne le carré de l'amplitude de la lumière réfractée. M. Knochenhauer, qui a publié en 1839 un traité

mathématique de la lumière fort remarquable, mais déjà bien en arrière de la science, parce que l'auteur n'a pas eu connaissance à temps de tous les derniers travaux de M. Cauchy qu'il nous a été donné d'analyser, regrettait vivement d'être obligé de se traîner continuellement d'hypothèse en hypothèse, de comparaison en comparaison. Ces réflexions feront mieux ressortir les avantages de la théorie de M. Cauchy, qui, sans faire aucune supposition arbitraire, dit seulement sous quelles conditions les formules générales auxquelles il parvient se réduiront aux formules de Fresnel, de M. Brewster, de M. Young, etc... Ces conditions reviennent toujours à supposer que le milieu dont il s'agit polarise complétement la lumière, et est de la nature de ceux où les vibrations longitudinales ne peuvent se propager sans s'affaiblir.

Réflexion à la surface des corps opaques et des métaux.

38. La théorie de M. Cauchy, qui, comme nous l'avons vu, résout avec tant de facilité le grand problème de la réflexion et de la réfraction à la surface ou dans l'intérieur des corps transparents, et qui n'est en réalité que l'expression la plus naturelle des faits, s'étend avec plus de bonheur encore aux modifications que la présence d'un corps opaque fait subir à la propagation de la lumière. Comme cette application, dont M. Cauchy a le principal mérite, date seulement de quelqnes années, et qu'elle est à peine connue, nous serons forcé d'entrer dans quelques détails qui, nous n'en doutons pas, seront accueillis avec intérêt.

39. Lorsque la lumière vient frapper un corps, que nous supposerons toujours isophane, mais non transparent, les ondes incidentes donnent encore naissance à des ondes réfléchies et à des ondes réfractées: seulement, ces dernières, en se propageant dans le corps opaque, s'affaibliront rapidement, de manière à devenir insensibles à une distance comparable à la longueur d'une ondulation lumineuse; par exemple, à la distance d'un demi-millième de millimètre. Alors même il existera un indice de réfraction, qui sera encore le rapport entre les sinus des angles d'incidence et de réfraction, formés par la normale à la surface réfléchissante avec les perpendiculaires aux plans des ondes incidentes et réfractées; mais il ne suffira pas à définir le milieu opaque dont il s'agit, et l'on ne

pourra plus déduire les lois des phénomènes de la connaissance de cet indice de réfraction. On aura besoin, comme on peut facilement le concevoir *à priori*, d'une seconde donnée qui pourra être le coefficient d'extinction, c'est-à-dire la constante qui indique la rapidité plus ou moins grande avec laquelle le mouvement s'éteint en pénétrant dans le corps opaque ; de sorte que les formules qui représentent avec une approximation suffisante, dans la plupart des cas, les lois de la réflexion et de la réfraction, peuvent se déduire, pour les corps transparents, d'une seule donnée, savoir, de l'indice de réfraction, et pour les corps opaques de deux données, savoir, de l'indice de réfraction et du coefficient d'extinction. On sent parfaitement que ces conclusions sont entièrement conformes à la nature des faits ; car n'est-il pas très naturel, dans la théorie de la lumière, d'établir une distinction fondamentale entre les corps transparents et les corps opaques? Si, pour ces derniers, la théorie exige deux données au lieu d'une, cela tient à ce qu'ils ont la double propriété de réfracter plus ou moins la lumière, et de l'éteindre plus ou moins rapidement : il n'est pas plus permis de faire abstraction de la seconde propriété que de la première.

40. L'indice de réfraction et le coefficient d'extinction qui définissent le corps opaque en lui-même, intrinsèquement, ont l'inconvénient de ne pouvoir pas être obtenus ou constatés à l'aide d'expériences directes, de sorte qu'ils ne peuvent pas servir à définir immédiatement et *à priori* le corps opaque dont il s'agit, en tant qu'il est question d'appliquer les formules données par la théorie au calcul des modifications qu'il fait subir à la lumière. A ces deux quantités, il fallait donc nécessairement en substituer deux autres, liées avec les premières, et qu'on pût déterminer facilement à l'aide d'un petit nombre d'expériences. M. Cauchy a choisi pour ces deux quantités deux angles qu'il désigne sous les noms d'incidence principale, et d'azimut principal de réflexion. Le premier de ces angles est ce que d'autres auteurs ont appelé angle de polarisation maximum, *maximum polarising angle ;* il ne doit pas être confondu avec un autre angle qui, à la vérité, en diffère souvent très peu ; savoir, avec l'angle d'incidence, pour lequel la quantité de lumière polarisée dans le plan d'incidence est la plus grande possible, et pour lequel aussi l'azimut de réflexion devient un maximum. Le second

angle est l'azimut principal de réflexion que l'on pourrait remplacer par l'azimut du rayon restauré ou ramené par deux réflexions sous l'incidence principale à être polarisé rectilignement; les tangentes de ces deux angles sont tellement liées l'une à l'autre, que la seconde se déduit facilement de la première. Deux angles, voilà donc les seules données que M. Cauchy emprunte à l'expérience; elles sont l'une et l'autre indispensables; l'une sans l'autre ne suffirait pas; et lorsqu'on voudra comparer les résultats de la théorie avec les faits, on devra toujours avoir déduit préalablement ces données d'observations faites sur le corps même auquel les expériences sont relatives. Dans les expériences de M. Brewster, les incidences principales relatives à quatre métaux, l'argent, le mercure, le métal des miroirs et l'acier, étaient respectivement : 73°, 78° 27′, 76°, 75°. Les azimuts principaux de réflexion, déterminés par les procédés directs ou indirects, étaient : 42°, 35°, 32°, 30° 30′, ou 42° 23′, 34° 55′, 31° 47′, 28° 56′. En partant de ces données, M. Cauchy a calculé les indices de réfraction, et, ce qui n'avait pas encore été fait avant lui, les coefficients d'extinction. Les indices de réfraction sont : 0,343, 1,77, 1,716, 1,813, et les coefficients d'extinction : 2,95, 4,41, 3,39, 3,04.

41. Les indices de réfraction déduits de la théorie sont beaucoup plus faibles qu'on ne l'avait cru communément; ce qui ne doit pas étonner, puisqu'on les avait calculés jusqu'ici en étendant aux corps opaques une loi qui évidemment ne s'applique qu'à ceux des corps transparents qui polarisent complétement la lumière. On se disputait pour savoir si l'indice de réfraction du mercure était 4,9, ou 5,8, tandis que cet indice est en réalité 1,7. M. Mac-Cullagh avait même affirmé que l'indice de réfraction du mercure était égal à 15 et celui de l'argent pur à 35. Ces nombres, hors de proportion entre eux et avec tous les indices de réfraction que l'on a pu déterminer par l'expérience, indiquent suffisamment que la théorie de M. Mac-Cullagh laissait beaucoup à désirer; et en effet ce géomètre a avoué qu'il n'avait obtenu ses formules qu'en assignant à la vitesse de propagation une valeur imaginaire. C'était supposer que le mouvement ne se propage pas du tout dans le milieu opaque, ou, ce qui revient au même, que l'onde réfractée est imaginaire : mais, dans cette hypothèse, comment peut-on penser à calculer l'indice de réfraction

ou le rapport de l'épaisseur de l'onde incidente, à l'épaisseur de l'onde réfractée ? Il faut nécessairement alors donner une définition arbitraire de cet indice de réfraction, qui devient ce que l'on veut, 5 ou 17, ou 35, etc. M. Cauchy admet, au contraire, que l'angle de réfraction et la vitesse de propagation de la lumière dans le milieu opaque ont des valeurs réelles, distinctes, par conséquent, des expressions imaginaires désignées sous ces deux noms par M. Mac-Cullagh, et dès lors les indices de réfraction ont nécessairement les valeurs qu'il leur a assignées.

42. Après cette digression essentielle sur la manière de définir les corps opaques, revenons à la comparaison de la théorie avec l'expérience. M. Brewster ayant, comme nous l'avons déjà indiqué, fait réfléchir par un métal un rayon polarisé à 45° du plan d'incidence, a mesuré l'azimut après la première et la seconde réflexion, dans le cas où elles ont lieu sous des incidences égales et tellement choisies, que la seconde réflexion produise un nouveau rayon doué comme le rayon incident de la polarisation rectiligne ; et il résulte des propositions énoncées n° 28 que, dans ce cas, la tangente de l'azimut doit acquérir, après la première et après la seconde réflexion, deux valeurs, dont l'une soit la racine carrée de l'autre. En faisant usage successivement des métaux dont les noms suivent, M. Brewster a trouvé que l'azimut était :

Pour l'argent	après la 1re réflexion	42°,	après la 2e	39° 40′
Pour le cuivre	—	36° 30′	—	29°
Pour le mercure	—	35°	—	26°
Pour le métal de miroir	—	32°	—	21°

Or, les tangentes des quatre azimuts, mesurées après la seconde réflexion, ont pour racines carrées les tangentes des quatre angles 42° 23′, 36° 40′, 34° 56′, 31° 47′, qui diffèrent très peu, comme on le voit, des quatre azimuts fournis après la première réflexion par des expériences directes, les différences étant respectivement —23′, — 10′, 4′, 13′. Un autre mode d'expérimentation avait donné à M. Brewster 42° 30′ pour l'azimut du rayon qui a subi une première réflexion à la surface de l'argent ; et il est remarquable que l'angle 42° 23′ déduit de la théorie est compris entre les azimuts 42° et 42° 30′ fournis par deux expériences. Pour le platine, l'acier

et le plomb, les azimuts du rayon étaient, après la première réflexion, 34°, 30° 30′, 26°; après la seconde, 22°, 21°, 11°; or, les tangentes des trois azimuts relatifs à la seconde réflexion ont pour racines carrées les tangentes des angles 32° 26′, 28° 56′, 23° 48′, et les différences de ces angles aux azimuts, mesurés après la première réflexion, sont respectivement 1° 34′, 1° 34′, 2° 12′. Quoique ces différences surpassent notablement celles qui étaient relatives aux quatre autres métaux, elles ne sont pas assez considérables pour ne pouvoir être attribuées aux erreurs d'observation qui peuvent certainement s'élever au moins à 2°, et à cette circonstance particulière, que la lumière employée par M. Brewster n'était pas une lumière homogène comme les formules le supposent, mais une lumière blanche composée de rayons de diverses couleurs.

43. L'une des plus belles applications de la théorie de M. Cauchy est, sans contredit, la détermination du rapport entre la quantité de lumière réfléchie par un métal sous une incidence quelconque, et la lumière incidente. On sait combien la détermination de ce rapport est délicate, combien les expériences de photométrie exigent de précautions pour que l'on puisse ajouter quelque confiance aux résultats qu'elles donnent. Les essais photométriques de Bouguer, de Lambert et de M. Potter sont évidemment très imparfaits; on ne peut voir dans les nombres qu'ils ont publiés qu'une première approximation : lorsqu'ils comparaient deux rayons lumineux, ils n'avaient aucun moyen rigoureux de diminuer la lumière la plus intense d'une quantité bien connue, pour la rendre égale à la plus faible, et de s'assurer que l'égalité était réellement établie. M. Arago, en démontrant que la quantité de lumière qui passe à l'état de rayon ordinaire est proportionnelle au carré du cosinus de l'angle que fait la section principale du cristal avec le plan de polarisation du rayon incident, lorsque ce rayon traverse la plaque perpendiculairement, a trouvé par là même un moyen admirable de diminuer, dans un rapport quelconque, une lumière donnée ou de la fractionner à volonté. Il a trouvé d'ailleurs dans les phénomènes de la polarisation chromatique, phénomènes qu'il observa le premier, tout ce qui est nécessaire pour constater l'égalité parfaite des rayons incident et réfléchi, après que l'intensité de l'un de ces rayons a été convenablement réduite par fractionnement.

Comme on peut, dans tous les cas, ramener une question quelconque de photométrie à la comparaison des deux rayons, l'un ordinaire, l'autre extraordinaire, que l'on obtient en faisant passer un rayon polarisé rectilignement à travers une lame doublement réfringente; et que les intensités de ces deux rayons, teints de couleurs complémentaires, seront rigoureusement égales, lorsque leur superposition donnera naissance à une lumière tout-à-fait incolore ou à du blanc : M. Arago a réellement résolu d'une manière complète le grand problème de la photométrie, et les vrais amis de la science doivent appeler de tous leurs vœux la publication de ses observations.

44. Devançant l'expérience et relevant le gant qu'on lui avait jeté, M. Cauchy n'a pas craint de produire au grand jour les résultats numériques de ses formules. Il avait à cœur de prouver, de manière à dissiper tous les doutes, que sa théorie ne ressemblait en rien à une méthode d'interpolation ; et dans le fait, pour calculer l'intensité de la lumière réfléchie par un métal sous une incidence quelconque, il ne s'est servi et n'a voulu se servir d'aucune donnée photométrique ou d'aucune expérience d'intensité. Voici d'abord les lois générales qu'il croit pouvoir énoncer : 1° Tandis que la lumière réfléchie sous l'incidence perpendiculaire est généralement très faible pour un corps transparent, elle devient souvent considérable pour un corps opaque, elle peut même égaler ou surpasser la moitié de la lumière incidente. 2° Dans le passage de l'incidence perpendiculaire à l'incidence de 73° et au-delà, la variation de cette intensité est presque insensible et à peine égale à un centième. 3° A la rigueur, en partant de l'incidence perpendiculaire, l'intensité de la lumière réfléchie commence par recevoir un léger accroissement, mais cet accroissement est à peine sensible.

Passant ensuite à des déterminations précises, M. Cauchy trouve que l'intensité de la lumière incidente étant prise pour l'unité, l'intensité de la lumière réfléchie sous l'incidence perpendiculaire par l'argent, le mercure, le métal des miroirs et l'acier, est respectivement :

0,88, 0,70, 0,62, 0, 57.

Sous l'incidence principale, les quantités de lumière réfléchie seraient :



0,88, 0,70, 0,62, 0,56.

Si l'on considère en particulier l'acier, la lumière réfléchie par sa surface sous les incidences de

0°, 10°, 30°, 50°, 73°, 75°

sera :

0,55, 0,55, 0,55, 0,54, 0,55, 0,56.

Il est bien entendu que l'incidence principale et l'azimut principal relatifs à ces quatre métaux sont censés avoir les valeurs assignées plus haut comme résultat des expériences de M. Brewster.

45. Nous regrettons de ne pouvoir faire une comparaison rigoureuse de ces données de la théorie avec les résultats des expériences. Qu'il nous soit permis au moins de dire que les nombres ci-dessus présentés s'accordent aussi bien qu'on pouvait le désirer avec le petit nombre d'expériences photométriques déjà connues. Bouguer assigne précisément 0,75 pour l'intensité de la lumière réfléchie par le mercure sous l'angle de 11° 1/2, et M. Potter ayant mesuré la lumière réfléchie sous diverses incidences par l'acier et le métal des miroirs, a obtenu des nombres fort peu différents les uns des autres, dont la moyenne est 0,66 pour le premier de ces métaux, et 0,56 ou 0,57 pour le second. M. Biot affirme, de son côté, que pour les corps dont la force réfléchissante est énergique, la quantité de lumière réfléchie sous diverses incidences n'éprouve que des variations très faibles, comme l'indiquent les formules de M. Cauchy. Nous osons avancer que tous les nombres de M. Cauchy sont trop évidemment ce qu'ils devaient être naturellement, ce que les connaissances acquises avaient laissé entrevoir qu'ils seraient, pour qu'on puisse douter raisonnablement de la vérité de sa théorie. Une théorie fausse, et sans rapport avec les lois de la nature, aurait certainement donné quelques nombres, au moins, complétement en dehors des faits. S'il existe quelque différence entre les quantités de lumière calculées et observées, et si ces différences, ce que nous ne croyons pas, ne sont point comparables aux erreurs d'observation, cela tiendra peut-être à ce que, dans ses formules, M. Cauchy a négligé les termes relatifs à la dispersion, et réduit à l'unité une constante qui en diffère généralement assez peu, et qui a cette valeur dans un corps transparent qui polarise complétement la lumière. L'observation peut seule

apprendre quelle valeur on doit réellement assigner à cette constante.

46. Les nombres obtenus ne sont plus les mêmes quand on substitue à la lumière ordinaire de la lumière polarisée. Effectivement, si, en prenant pour unité l'intensité de la lumière incidente, on représente l'intensité de la lumière réfléchie par Ip ou par Ii, selon que les rayons sont polarisés perpendiculairement au plan d'incidence, ou suivant ce même plan, et si l'on fait réfléchir les rayons sous l'incidence principale, on trouvera :

Pour l'argent,	Ii = 0,96	Ip = 0,79.
Pour le mercure,	Ii = 0,94	Ip = 0,46.
Pour le métal des miroirs,	Ii = 0,90	Ip = 0,35.
Pour l'acier,	Ii = 0,86	Ip = 0,28.

La quantité de lumière réfléchie, quand le rayon est polarisé perpendiculairement au plan d'incidence, peut donc, dans certains cas, n'être que le tiers ou le quart de ce qu'elle aurait été, si le rayon avait été polarisé dans le plan d'incidence. Ce résultat si curieux n'avait encore été énoncé par aucun physicien ; les nombres que nous avons cités n'avaient été nullement prévus ; toute la gloire, ici, appartient à l'analyse, qui nous a montré ce que l'on pouvait espérer des mathématiques convenablement appliquées à la physique. En admettant avec tous les physiciens que, pour obtenir l'intensité I d'un rayon de lumière ordinaire modifié par la réflexion, il suffit de calculer la demi-somme $\frac{Ii + Ip}{2}$ des intensités des deux rayons primitivement égaux, mais polarisés, l'un suivant le plan d'incidence, l'autre perpendiculairement à ce plan, on retrouvera les nombres : 0,88, 0,70, 0,52, 0,57, qui indiquent quelles sont, pour les quatre métaux dont il s'agit, les quantités de lumière réfléchie sous l'incidence principale.

En calculant pour l'acier les valeurs de Ii, Ip relatives à diverses incidences, et adoptant pour l'azimut principal de réflexion la valeur déduite de l'observation indirecte, on trouve pour les incidences de :

	0°	10°	30°	50°	73°	74°
Ii =	0,548	0,553	0,596	0,683	0,814	0,859
Ip =	0,548	0,543	0,499	0,402	0,261	0,262
$\frac{Ii + Ip}{2}$ =	0,548	0,548	0,547	0,542	0,548	0,561

L'accord suffisamment constaté de ces nombres avec l'expérience prouve de nouveau que la décomposition d'un rayon de lumière ordinaire en deux rayons polarisés à angle droit n'est point une chimère, et devient un argument de plus en faveur de la théorie des ondulations ou des vibrations transversales.

Variations que subissent l'anomalie et l'azimut d'un rayon simple quand le plan à partir duquel se comptait l'azimut vient à tourner. — Effets de la réflexion et de la réfraction quand les divers plans de réflexion et de réfraction ne se confondent plus avec le plan d'incidence.

47. Nous n'entrerons pas à ce sujet dans de grands détails ; nous nous contenterons d'énoncer quelques propositions fondamentales, plus propres à faire connaître les lois trop peu étudiées jusqu'ici, de la polarisation elliptique. Nous regrettons vivement que l'absence presque complète d'expériences nous condamne à laisser à l'état d'abstraction cette partie de notre analyse véritablement aride, et que l'on pourra omettre sans aucun inconvénient.

1° Observons d'abord que si, dans un rayon plan, les déplacements sont mesurés parallèlement à un axe fixe, l'amplitude des vibrations parallèles à cet axe sera évidemment la projection sur le même axe de l'amplitude du rayon, c'est-à-dire de l'amplitude maximum, mesurée sur la droite que décrit une molécule.

2° Si, au lieu d'un rayon plan, on considère dans un milieu isophane et transparent un rayon doué de la polarisation circulaire, l'amplitude mesurée parallèlement à un diamètre du cercle que décrit une molécule sera ce diamètre même ; et si l'on décompose le rayon donné en deux autres polarisés, l'un suivant un plan fixe, l'autre perpendiculairement à ce plan, les phases des rayons composants seront deux angles dont la différence équivalente à l'anomalie pourra être réduite, abstraction faite du signe, à un angle droit. Si l'on choisit le sens suivant lequel se compteront dans le plan fixe les déplacements positifs, de manière que la différence

dont il s'agit soit négative, les cosinus des deux phases se réduiront au sinus et au cosinus de la seconde, et il en résultera que lorsqu'un rayon doué de la polarisation circulaire sera décomposé en deux autres, polarisés rectilignement suivant deux plans rectangulaires entre eux, chacun des rayons composants aura pour phase un angle que l'on pourra supposer équivalent, au signe près, à l'angle compris entre le plan qui renferme ce rayon, et le rayon du cercle décrit par une molécule

3° Dans un rayon polarisé circulairement, chaque molécule se meut sur le cercle qu'elle parcourt, avec une vitesse constante, de sorte que l'angle et l'arc décrits par le rayon vecteur, mené du centre du cercle à la molécule, sont proportionnels au temps que le rayon vecteur emploie à les décrire.

4° La phase d'un rayon plan peut être censée se confondre avec l'angle compris entre le plan du rayon et la direction du déplacement absolu d'une molécule dans un rayon doué de la polarisation circulaire, résultant de la superposition de deux rayons polarisés en lignes droites, dont les plans de polarisation seraient perpendiculaires entre eux, et dont l'un serait précisément le rayon donné.

5° Dans un rayon doué de la polarisation elliptique, il suffit de faire passer le plan fixe, à partir duquel se compte l'azimut, par un des axes de l'ellipse que décrit une molécule, pour que l'anomalie se réduise, au signe près, à $\frac{\pi}{2}$, c'est-à-dire à un angle droit.

6° Lorsqu'un rayon doué de la polarisation elliptique est décomposé en deux autres polarisés suivant deux plans rectangulaires entre eux, et que ces deux plans renferment les axes de l'ellipse décrite par une molécule, les deux derniers rayons deviennent ce que nous appellerons les rayons composants principaux, leurs plans, leurs phases et leurs amplitudes étant les plans principaux, les phases principales et les amplitudes principales. L'azimut relatif à un des plans dont il s'agit sera encore désigné sous le nom d'azimut principal. Cela posé, on verra, 1° que la différence des phases principales sera égale, au signe près, à un angle droit; 2° que les amplitudes principales se réduiront aux deux axes de l'ellipse décrite par une molécule; 3° que les azimuts principaux auront pour tangentes tri-

géométriques les rapports direct et inverse des amplitudes principales.

7° Lorsque la polarisation sera elliptique, le triangle qui aura pour sommet le centre de l'ellipse décrite par une molécule, et les positions occupées par cette molécule, à deux instants déterminés, offrira une surface dont le double aura pour mesure le produit des deux demi-axes par le sinus d'un angle proportionnel à l'intervalle compris entre ces deux instants.

8° Dans un rayon doué de la polarisation elliptique, le triangle qui aura pour sommet le centre de l'ellipse décrite par une molécule et les positions occupées par cette molécule à deux instants que sépare un intervalle égal au quart de la durée d'une vibration, offrira une surface équivalente à la moitié du rectangle construit sur les deux demi-axes de l'ellipse.

9° Si l'on décompose un rayon elliptique en deux rayons polarisés suivant deux plans rectangulaires entre eux, et dont l'un renfermerait un diamètre donné de l'ellipse décrite, dans chacun de ces rayons plans, les déplacements absolus d'une molécule mesurée, 1° à un instant donné; 2° à un second instant séparé du premier par le quart de la durée d'une vibration moléculaire, fourniront des carrés dont la somme sera le carré de la demi-amplitude.

10° Lorsqu'un rayon doué de la polarisation elliptique est décomposé en deux autres polarisés suivant deux plans rectangulaires entre eux, le carré de l'amplitude de chaque rayon composant équivaut à la somme des deux produits qu'on obtient en multipliant le carré de chaque axe de l'ellipse que décrit une molécule par le carré du cosinus de l'angle aigu que forme cet axe avec le plan de ce même rayon.

11° Lorsqu'un rayon doué de la polarisation elliptique est décomposé en deux autres, polarisés suivant deux plans rectangulaires entre eux, alors, pour obtenir le carré de l'amplitude de chaque rayon composant, il suffit de former les carrés des deux axes de l'ellipse que décrit une molécule, puis d'ajouter à la demi-somme e ces carrés leur demi-différence multipliée par le cosinus du double de l'angle aigu, compris entre le grand axe de l'ellipse et le plan du rayon que l'on considère.

12° Lorsqu'un rayon doué de la polarisation elliptique est décomposé en deux autres, polarisés perpendiculairement à un plan fixe et suivant ce même plan, les carrés des amplitudes des rayons composants offrent pour somme la somme des carrés des axes de l'ellipse que décrit cette molécule, et pour différence la différence entre les carrés du grand axe et du petit axe, multipliée par le cosinus du double de l'angle aigu compris entre le grand axe et le plan fixe.

13° Si l'on nomme anomalie principale celle qui est relative au système des rayons composants principaux, et qui peut toujours se réduire, au signe près, à un angle droit, on déduira immédiatement de la remarque qu'on vient de faire la proposition suivante.

Lorsqu'un rayon doué de la polarisation elliptique est décompesé en deux autres, polarisés perpendiculairement à un plan fixe et suivant ce même plan, le produit des amplitudes des rayons composants par le sinus de l'anomanie est égal au produit des amplitudes principales par le sinus de l'anomalie principale.

14° Dans un rayon doué de la polarisation elliptique, le double de l'azimut, relatif à un plan fixe quelconque, offre un cosinus proportionnel au cosinus du double de l'angle que forme avec le plan fixe un des axes de l'ellipse décrite par une molécule, et un sinus réciproquement proportionnel au sinus de l'anomalie.

15° Dans un rayon doué de la polarisation elliptique, le double de l'azimut relatif à un plan fixe, et le double d'un azimut principal, c'est-à-dire de l'azimut relatif à l'un des plans principaux, offrent des cosinus dont le rapport est le cosinus du double de l'angle aigu, formé par le plan fixe avec le plan principal que l'on considère, et des sinus dont le rapport inverse est le sinus de l'anomalie relative au plan fixe, ou ce sinus pris en signe contraire, suivant que l'anomalie principale est réductible à $+\frac{\pi}{2}$ ou à $-\frac{\pi}{2}$. Il en résulte que la cotangente de l'anomalie, relative à un plan fixe est proportionnelle au sinus du double de l'angle aigu, formé par le plan fixe avec l'un des plans principaux, et se réduit, au signe près au produit de ce sinus, par la cotangente du double de l'azimut principal relatif au dernier de ces plans.

48. Les diverses propositions que nous venons d'établir ne sont pas

seulement applicables à un rayon de lumière propagé dans un milieu isophane et transparent ; elles peuvent être étendues à un rayon propagé, dans un milieu doublement réfringent, ou dans un milieu qui absorberait la lumière. Pour s'en convaincre, il suffit de faire attention aux remarques suivantes.

Dans tout mouvement simple dont le module ne renferme pas le temps, la courbe décrite par une molécule est non seulement une courbe plane, mais de plus, comme l'avons déjà dit, une courbe fermée et rentrante sur elle-même. Si, dans le plan de cette courbe, on trace un axe quelconque, le déplacement de la molécule, mesuré parallèlement à l'axe dont il s'agit, sera le produit de deux facteurs, dont l'un (1) se réduira sensiblement à la demi-amplitude des vibrations parallèles à cet axe, tandis que l'autre facteur sera le cosinus de l'angle dont la partie variable est l'argument du mouvement simple, la partie constante étant ce que nous appelons le paramètre angulaire. Cet angle étant désigné sous le nom de phase, si dans le plan de la courbe décrite on trace d'abord un axe fixe, puis un second axe perpendiculaire au premier, les déplacements relatifs à ces deux axes offriront généralement deux phases et deux amplitudes distinctes. La différence de la seconde phase à la première est ce que nous appellerons l'anomalie du mouvement simple, et l'angle aigu qui aura pour tangente le rapport de la seconde amplitude à la première sera l'azimut relatif à l'axe fixe. Ces définitions étant admises, les relations entre les phases, les amplitudes, l'anomalie et l'azimut resteront évidemment les mêmes, soit que le module du mouvement simple se réduise à l'unité, soit qu'il varie avec les

(1) Le premier facteur dont il est ici question sera le produit d'une constante réelle par le module du mouvement simple, et, comme ce module, il ne variera pas d'une manière sensible quand on passera d'un point de la courbe décrite par une molécule à une autre. Par suite, cette courbe, quoiqu'à la rigueur différente de l'ellipse, en différera très peu, et en partant de mouvements infiniment petits, on pourra la supposer réduite à l'ellipse, comme nous le faisons ici. Il y a plus, elle se réduira exactement à une ellipse, si l'on suppose que, dans les équations des mouvements infiniment petits, on a pris pour variables indépendantes, avec le temps t, non plus les coordonnances x, y, z, du point de l'espace avec lequel coïncide au bout de ce temps la molécule que l'on considère, mais les coordonnées initiales de cette molécule.

coordonnées. Dans l'un et l'autre cas, la courbe décrite par chaque molécule sera une ellipse qui pourra quelquefois se réduire à un cercle ou à une droite. En effet, dans l'un et l'autre cas, le sinus et le cosinus de l'argument du mouvement simple pourront être exprimés par deux fonctions linéaires des déplacements mesurés, dans le plan de la courbe, suivant deux axes rectangulaires entre eux; et en égalant à l'unité la somme des carrés de ces deux fractions, on obtiendra pour l'équation de la courbe décrite une équation du second degré en vertu de laquelle les déplacements devront toujours conserver des valeurs finies; la seule différence entre le premier cas et le second, c'est que l'amptitude des vibrations parallèles à un axe quelconque restera invariable dans le premier cas, et variera dans le second, quand on passera d'une molécule à une autre; il sera d'ailleurs naturel de désigner sous le nom de phases principales, d'amplitudes principales, d'anomalies principales et d'azimuts principaux, les phases, les amplitudes, les anomalies et les azimuts qui correspondront aux axes mêmes de l'ellipse décrite par une molécule.

49. Comme, dans la théorie de la lumière, l'argument d'un mouvement simple est toujours indépendant du temps, il suit de ce que l'on vient de dire que la polarisation d'un rayon simple, propagé dans un milieu homogène, est toujours elliptique, circulaire ou rectiligne, lors même que ce milieu cesse d'être isophane ou transparent, et que les relations ci-dessus établies entre les phases, les amplitudes, les azimuts et les anomalies sont applicables à un rayon quelconque, pourvu que dans les énoncés des théorèmes, on substitue généralement au système de deux plans rectangulaires menés par la direction du rayon, le système de deux axes rectangulaires, tracés dans le plan de l'ellipse décrite par une molécule, et au système des plans principaux le système des deux axes de cette ellipse.

50. Il est facile d'appliquer les divers théorèmes ci-dessus établis à la recherche des modifications qu'éprouve un rayon simple, quand on lui fait subir plusieurs réflexions ou réfractions successives, opérées chacune par la surface de séparation de deux milieux isophanes, dont le premier au moins est transparent. En effet, à l'aide de ces théorèmes, en supposant connus, pour chaque rayon incident, l'azimut relatif au plan d'incidence et l'anomalie correspondante, on pourra déterminer les azimuts principaux, ainsi que les directions

des plans principaux ; et réciproquement, en supposant connus, pour chaque rayon réfléchi ou réfracté, les azimuts principaux, ainsi que les directions des plans principaux, on pourra déterminer, pour le même rayon, l'anomalie et l'azimut qui correspondront à un nouveau plan d'incidence. D'ailleurs, pour chaque réflexion ou réfraction, l'on saura comment l'anomalie et l'azimut, relatifs au plan d'incidence, varient dans le passage du rayon incident au rayon réfléchi ou réfracté, quand on connaîtra l'anomalie et l'azimut de réflexion ou de réfraction. Ainsi, en particulier, d'après ce qui a été dit plus haut, la variation de l'anomalie, dans le passage du rayon incident, au rayon réfléchi ou réfracté, ne sera autre chose que l'anomalie de réflexion ou de réfraction.

51. Lorsque le rayon incident est doué de la polarisation rectiligne, alors, pour que l'un des plans principaux du rayon réfléchi coïncide avec le plan d'incidence et de réflexion, il est nécessaire que l'anomalie de réflexion puisse être censée se réduire, au signe près, à un angle droit ; en d'autres termes, il est nécessaire que les coefficients de réflexion des rayons composants polarisés, l'un suivant le plan d'incidence, l'autre perpendiculairement à ce plan, offrent un rapport dont la partie réelle s'évanouisse. Cette condition étant supposée remplie, l'azimut de réflexion est ce que devient l'azimut principal du rayon réfléchi, quand on prend pour azimut du rayon incident 45°, et ce que nous nommerons, en conséquence, l'azimut principal de réflexion. L'incidence qui fournira l'azimut principal de réflexion sera nommée elle-même incidence principale. Si l'azimut principal de réflexion devient un angle droit, alors, quelle que soit la direction du plan de polarisation du rayon incident, l'incidence principale fournira un rayon réfléchi, polarisé dans le plan d'incidence : c'est ce qui arrive quand la réflexion a lieu à la surface du verre, ou d'autres corps transparents, capables, comme on le dit, de polariser complétement la lumière : alors l'incidence principale ne diffère pas de ce qu'on a nommé l'angle de polarisation. Mais, si l'azimut principal, n'étant pas nul, diffère d'un angle droit, le rayon réfléchi cessera d'être un rayon plan, et, pour obtenir la polarisation circulaire après une seule réflexion, il suffira, en faisant tourner le rayon incident sur lui-même, d'amener son plan de polarisation dans une position telle que l'azimut du rayon inci-

dent soit le complément de l'azimut de réflexion principal. En suivant cette règle, on pourra transformer un rayon plan en un rayon doué de la polarisation circulaire, à l'aide d'une seule réflexion effectuée, sous l'incidence principale, par la surface extérieure d'un métal ou d'un corps transparent qui, comme le diamant, polarise incomplétement la lumière. Si la réflexion était opérée par la surface intérieure d'un corps transparent, il pourrait y avoir, dans certains cas, deux incidences principales, l'une inférieure, l'autre supérieure à l'angle de réflexion totale. Lorsque la réflexion est opérée par la surface extérieure d'un corps opaque, et en particulier d'un métal, l'incidence principale coïncide avec ce que M. Brewster a nommé *the maximum polarising angle*, et ne doit pas, comme nous l'avons déjà dit, être confondue avec un autre angle qui, à la vérité, en diffère souvent très peu, savoir, avec l'angle d'incidence pour lequel la quantité de lumière polarisée dans le plan d'incidence est la plus grande possible, et pour lequel aussi l'azimut de réflexion devient un maximum.

DEUXIÈME SECTION.

EXPLICATION RAISONNÉE ET COMPARÉE DES PHÉNOMÈNES DE L'OPTIQUE DANS LES DEUX SYSTÈMES DE L'ÉMISSION ET DES ONDULATIONS.

52. Nous n'avons pas encore complété le résumé des travaux de M. Cauchy relatifs à la lumière, mais ce qu'il nous reste à dire sera mieux compris quand nous l'aurons fait précéder d'un exposé détaillé des faits constatés par l'expérience. Cet exposé d'ailleurs aura un autre avantage, il fera ressortir par des arguments purement physiques la vérité du système des ondulations que l'analyse du grand géomètre rend si évidente.

Après avoir décrit et expliqué chaque classe de faits, nous rappellerons la théorie qu'en a donnée M. Cauchy. Les considérations suivantes sont empruntées en partie à un ouvrage vraiment remarquable de l'illustre directeur du collége de la Trinité à Dublin, de M. Lloyd. Son opuscule, imprimé à Dublin en 1841, a pour titre: *Lectures on the Wave-theory of light*.

Propagation et vitesse de la lumière. — 53. Tous les savants s'accordent à regarder comme un fait démontré que la lumière se transmet d'un point à l'autre de l'espace dans un temps déterminé, et que la vitesse de sa propagation est à peu près de 70,000 lieues par seconde. Une même molécule émise par le corps lumineux parcourt-elle successivement les divers points de l'espace avec cette incroyable vitesse? Ou bien plutôt, entre le corps lumineux et le corps éclairé, existe-t-il une suite innombrable de molécules qui, sollicitées tour à tour par un mouvement de va-et-vient, vibrent entre certaines limites, en transmettant de proche en proche le mouvement initial? Il y aurait *émission* et *transmission* dans la première hypothèse, il y a *vibration* et *ondulation* dans la seconde. Nous sommes plus familiarisés avec le mouvement de translation que nous voyons, que nous touchons, qui nous emporte souvent nous-mêmes; les mouvements vibratoires nous échappent davantage, quoiqu'ils s'exécutent sans cesse autour de nous. Si la surface d'une eau sta-

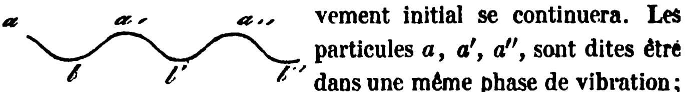
gnante est ébranlée en un de ses points par une cause étrangère, les molécules les plus voisines du centre d'ébranlement s'élèvent et s'abaissent tour à tour, et ce mouvement réellement vibratoire se communique de proche en proche et successivement jusqu'aux limites de la surface liquide. L'ensemble des molécules qui proéminent ou dominent la surface à un instant donné, constitue ce qu'on appelle une *onde*. Il est facile de se convaincre que cette onde ne se compose pas dans deux instants consécutifs des mêmes molécules, en observant le mouvement d'un corps flottant; on le voit, en effet, non pas s'éloigner du centre d'ébranlement, ce qui aurait lieu nécessairement si les molécules sur lesquelles il repose avaient un mouvement de translation, mais s'élever ou s'abaisser suivant qu'il est atteint ou dépassé par une onde. Il y a donc réellement alors vibration, ondulation, et non pas translation. Le son nous présente un autre exemple remarquable des mouvements vibratoires : il se communique du corps vibrant à l'oreille à travers toutes les particules d'air intermédiaire, tandis que chacune de ces particules parcourt un très petit espace, par un mouvement de va-et-vient.

L'application à la lumière de ces deux sortes de propagation du mouvement a donné naissance aux deux théories de l'émission et des ondulations. Dans la première de ces théories, qui a eu pour créateur l'immortel Newton, le corps lumineux lance ou émet dans toutes les directions des particules d'une inappréciable ténuité; dans la seconde, le rôle de ce même corps lumineux consiste à mettre en vibration un milieu élastique qu'on nomme éther, absolument comme un corps sonore fait vibrer l'air. L'éther pénètre tout l'espace et les corps même les plus solides; il est si subtil qu'il n'oppose aucune résistance appréciable aux mouvements des planètes. Le jésuite Grimaldi et Huygens ont été les premiers et, avec Jouny et Fresnel, les plus habiles défenseurs du système des ondulations. Auquel de ces deux systèmes faut-il donner la préférence? Pour répondre à cette grave question, interrogeons les faits.

54. Mais d'abord, pour mieux faire comprendre la nature de l'onde lumineuse et son mode de propagation, recourons à la comparaison suivante.

Concevons une corde tendue horizontalement, et fixée par une

de ses extrémités à un point fixe; puis supposons que tenant l'autre extrémité nous lui imprimions un petit mouvement en élevant et abaissant tour à tour la main ; nous verrons aussitôt une série d'ondes se propager le long de la corde avec un mouvement progressif uniforme. Il est bien évident que chaque particule de la corde exécute de simples vibrations verticales ; mais comme ce mouvement vibratoire se communique de la première particule à la seconde, de la seconde à la troisième, etc., il s'étend de proche en proche à toute la longueur de la corde. Il en résulte aussi que quelques unes des particules atteignent leur position la plus élevée, que les autres sont au point le plus bas de leur course, pendant que les particules intermédiaires ne se trouvent ni au maximum d'élévation ni au minimum d'abaissement, mais à une distance moyenne de la position d'équilibre. Donc, pendant que chaque point considéré isolément exécute son mouvement vertical de va-et-vient, une onde se propage horizontalement le long de la corde ; elle sera suivie régulièrement d'une seconde, d'une troisième onde, etc., tant que le mouvement initial se continuera. Les particules a, a', a'', sont dites être dans une même phase de vibration;



il en est de même des particules b, b', b''.... Une onde se compose de toutes les particules comprises entre deux points de même phase, entre a et a' par exemple, ou entre b et b'. La longueur de l'onde est la distance du point a au point a', ou du point b au point b', distance mesurée dans le sens de la propagation du mouvement. Il est évident, d'après ce que nous venons de dire, qu'une onde comprend des particules dans toutes les phases de vibration.

Considérons maintenant, non plus une seule corde, mais un nombre indéfini de cordes semblables aboutissant à un même point, et admettons que la cause qui va mettre chacune d'elles en vibration agisse toujours de la même manière, avec la même intensité. Dès lors, des ondes égales se propageront avec la même vitesse dans toutes les cordes, et parviendront dans des temps égaux aux points de l'espace situé à la même distance du centre d'ébranlement ; de sorte que tous les points qui seront dans une même phase de vibration feront partie d'une même surface sphérique, dont le centre est à l'origine du mouvement.

Si, à la place de ces cordes, nous considérons des rayons formés de particules éthérées unies ou liées par leur mutuelles attractions, tout ce que nous venons de dire s'appliquera à la propagation des ondes éthérées, auxquelles l'action d'un corps lumineux aura donné naissance. Nous comprendrons alors facilement comment, dans un même milieu, un mouvement ondulatoire peut se propager sphériquement à partir du centre lumineux. La longueur de l'onde lumineuse sera la distance mesurée dans chaque direction partant du centre, de deux molécules, constituées dans une même phrase de vibration ; c'est par conséquent l'espace à travers lequel se transmet le mouvement ondulatoire, pendant le temps d'une simple vibration. Dès lors, si l désigne la longueur de l'onde, t le temps d'une vibration, et v la vitesse de propagation des ondes, on aura $l = vt$: c'est l'équation fournie par la théorie de M. Cauchy.

55. Le fait incontesté de la vitesse énorme de la lumière ne semble-t-il pas suffire à renverser l'hypothèse de l'émission? Si chaque molécule lumineuse pesait un grain ou 5 centigrammes, sa quantité de mouvement, animée qu'elle est d'une si excessive vitesse, serait égale à celle d'un boulet de 75 kilogrammes, parcourant 324 mètres dans une seconde. Le poids de la molécule lumineuse est en réalité des millions de fois plus petit que nous ne l'avons supposé ; mais comme, d'un autre côté, nous pouvons faire agir à la fois plusieurs millions de ces molécules concentrées au foyer d'une lentille, l'effet mécanique produit par la somme de leurs quantités de mouvements devrait pouvoir être rendu sensible, ce qu'il a été impossible d'obtenir dans les circonstances les plus favorables.

Nous convenons toutefois que ces résultats négatifs ne combattent pas invinciblement l'hypothèse de l'émission des molécules lumineuses avec une incomparable vitesse, on peut les supposer douées d'une ténuité suffisante pour expliquer l'absence de toute impulsion mécanique appréciable. Mais ces molécules si rapides devraient au moins agir les unes sur les autres, quand elles se croisent par millions au foyer d'une léntille, et cette action devrait se manifester par des phénomènes particuliers ; or, les recherches les plus persévérantes n'ont rien révélé de semblable.

56. Il est contre le système de l'émission une difficulté beaucoup plus sérieuse. M. Arago a prouvé, par de nombreuses expériences,

que la lumière se réfracte toujours sous le même angle, et que par conséquent la vitesse de la lumière reste la même, quelle que soit la source qui lui a donné naissance, le soleil ou une étoile fixe, un ver luisant ou la phosphorescence du bois pourri ; et quelles que soient les modifications que lui aient fait subir, dans les espaces célestes, la réflexion à la surface des planètes, la réfraction, etc....

Cette vitesse constante et immuable semble inexplicable dans la théorie de Newton. On démontre par le calcul que la force d'impulsion nécessaire pour communiquer à la lumière la vitesse observée est un million de fois plus grande que la force d'attraction à la surface de la terre, et il faudrait que cette force d'impulsion, restant la même pour tous les corps célestes, communiquât la même vitesse à toutes les particules lumineuses émises. Ce n'est pas tout encore : Laplace a démontré que si le diamètre d'une étoile fixe était 250 fois plus grand que celui du soleil, sa densité restant la même, l'attraction exercée à sa surface détruirait la quantité de mouvement de la molécule lumineuse émise, de sorte que cet astre serait invisible à de grandes distances. Une moindre masse aurait pour effet inévitable de diminuer au moins cette quantité de mouvement ; par conséquent, même en supposant que le pouvoir émissif reste constant pour tous les corps, les vitesses réellement communiquées aux molécules lumineuses seraient différentes, ce qui ne peut s'accorder avec les faits observés.

57. On ne pourrait échapper à cette difficulté qu'en recourant à une hypothèse par laquelle M. Arago crut pouvoir expliquer les expériences que nous venons de rappeler, et que les émissionistes ont accueillie avec enthousiasme : il faudrait admettre que les corps lumineux émettent des rayons de toutes les vitesses, que les seuls rayons d'une vitesse déterminée sont visibles, et qu'eux seuls produisent dans l'œil la sensation de la lumière. Ainsi, le rouge, le jaune, le vert, le bleu, le violet... solaires, seraient respectivement accompagnés de rayons pareils, mais obscurs par défaut ou par excès de vitesse. L'existence de raies noires découvertes dans le spectre solaire par Fraunhofer, Wollaston, Ritter, semblait donner quelque consistance à cette hypothèse tout à fait arbitraire, et que de nouvelles expériences rendent de plus en plus vaine. On a reconnu que toute augmentation ou diminution de vitesse n'enlève pas seulement

aux rayons lumineux leur volubilité, mais qu'elle les dépouille de leurs propriétés photogéniques ; ils cessent d'agir chimiquement à l'instant où ils perdent, par un changement de vitesse, la faculté de produire sur la rétine des sensations lumineuses. Bien plus, M. Edmond Becquerel, sur les indications de M. Arago, vient d'établir par l'expérience que les rayons solaires se comportent exactement de même dans l'air et dans l'eau, quoique dans l'air la lumière, suivant le système de l'émission, se meuve sensiblement moins vite que dans l'eau. La vitesse serait donc ici sans influence, ce qui est en contradiction manifeste avec l'hypothèse admise : on pourrait peut-être, comme l'a fait remarquer M. Arago, la faire concorder de nouveau avec les faits, en disant que les phénomènes photogéniques dépendent, non d'une action exercée à la surface, mais d'une action naissant dans l'intérieur de la couche, et l'on serait amené forcément à établir une distinction entre l'intérieur et la surface d'une couche dont l'épaisseur, suivant M. Dumas, serait inférieure à un millionième de millimètre. De nouvelles expériences imposeront de nouvelles complications. N'est-ce pas là bien plus que les épicycles de Ptolémée ? M. Arago serait vraiment trop bon de venir plus longtemps au secours d'une théorie qu'il a renversée de fond en comble par une expérience complétement décisive. L'assertion gratuite suivant laquelle les rayons d'une vitesse déterminée seraient seuls visibles, n'est défendue par aucun fait analogue dans la théorie du son ; elle ne s'accorde avec aucune des opinions admises sur la nature de la vision ; elle semble en contradiction manifeste avec l'existence des rayons diversement colorés, et qui restent tous visibles, malgré la différence qui existe entre leurs longueurs d'ondulation ou la vitesse des vibrations transversales qui leur donnent naissance.

En résumé, dans la théorie de l'émission, le grand fait démontré par M. Arago, que partout et toujours la vitesse de la lumière est la même dans un même milieu, demeure au moins un mystère, sinon une contradiction, tandis qu'il est la conséquence naturelle et immédiate du principe des ondulations. La vitesse de propagation d'un mouvement ondulatoire dépend, en effet, uniquement de l'élasticité et de la densité du milieu dans lequel il se propage et nullement de la cause excitante. Si donc, comme tout force à l'ad-

mettre, la densité et l'élasticité de l'éther restent les mêmes dans toute l'étendue de l'espace, la vitesse de la lumière sera nécessairement la même, quel que soit le corps lumineux.

Mouvement rectiligne de la lumière. — 58. On a souvent cherché, dans le mouvement rectiligne de la lumière, un argument invincible en faveur de la théorie de l'émission, une objection insoluble contre la théorie des ondulations. Si, disait-on, la lumière est le résultat des ondulations du fluide éthéré, comme le son est le produit des vibrations de l'air, la lumière doit, comme le son, se propager dans toutes les directions à partir de chaque centre d'ébranlement, et tourner tous les obstacles qu'on lui oppose. Un objet éclairé devrait devenir visible, malgré même les corps opaques interposés. Pour résoudre cette objection dont Newton avait fait son grand moyen de défense, et dont les progrès de la science ont fait au contraire une difficulté insurmontable contre la théorie de l'émission, il suffirait de faire observer que, bien qu'un mouvement vibratoire se propage dans toutes les directions autour de chaque centre d'ébranlement, rien ne force à admettre qu'il se propage avec la même intensité dans toutes les directions inclinées par rapport à l'onde primitive. L'analogie conduit au contraire à une conclusion opposée, car une multitude de faits démontrent que le son ne se propage pas dans toutes les directions avec la même intensité. Or, dès qu'il y a une différence entre la propagation directe et la propagation latérale, cette différence peut devenir très grande : on peut supposer l'éther tellement constitué, que l'intensité de la propagation latérale devienne insensible. On a tort d'ailleurs de chercher dans la théorie du son des objections contre la propagation de la lumière. L'acoustique est réellement moins avancée que l'optique : on connaît mieux la forme des ondes lumineuses que la forme des ondes sonores ; on parle toujours d'ondes sphériques sans trop savoir ce qu'on avance ; il me paraît démontré par des expériences certaines qu'au moins à une certaine distance du centre d'ébranlement l'onde sonore, loin d'être essentiellement sphérique, peut même être plane. Supposons, par exemple, que sur une ouverture longitudinale faite à la paroi supérieure d'une caisse rectangulaire, on tende une corde qui puisse faire vibrer à l'unisson la masse d'air renfermée dans la caisse. Alors, si les oscillations de la corde sont parallèles à la paroi supérieure, le mouvement

ondulatoire ne se transmettra en aucune manière à l'air de la caisse, qui ne rendra aucun son ; tandis que si les oscillations de la corde se font dans un plan perpendiculaire à la paroi, la caisse rendra un son très distinct. Donc ce son ne se propage pas avec la même intensité dans toutes les directions.

Mais la réponse à cette objection repose, comme nous le savons, sur des bases beaucoup plus solides qu'une simple analogie. Appelant à son aide la rigueur mathématique, et réduisant en nombre le problème de la propagation de la lumière, Fresnel, et bien des géomètres après lui, ont démontré que les faits observés sont en parfait accord avec la théorie des ondulations ; que les ombres calculées sont bien celles que donne l'expérience.

Réflexion et réfraction. — 59. Pour expliquer les phénomènes de la réflexion et de la réfraction, on suppose, dans la théorie de Newton, que les particules des corps et les molécules lumineuses exercent les unes sur les autres une action mutuelle. Très près du contact, cette action est d'abord attractive ; elle devient répulsive à une distance un peu plus grande, pour redevenir attractive encore, puis répulsive, etc. Cette hypothèse est en elle-même fort raisonnable ; cette succession de forces alternativement attractives et répulsives semble pouvoir expliquer seule les phénomènes de la cohésion, et pourrait tout aussi bien trouver place dans la théorie de la lumière. D'ailleurs, en s'appuyant sur ce principe unique, Newton a établi rigoureusement les lois de la réflexion et de la réfraction, et l'on ne pourrait pas dire, en conséquence, que le système de l'émission est impuissant à expliquer ces deux grandes classes de phénomènes, en tant, toutefois, qu'on les considère comme isolés ; car la simultanéité de la réflexion et de la réfraction dans un même rayon qui, en atteignant la surface d'un même milieu, serait à la fois en partie réfléchi, en partie réfracté, est un fait que la théorie de Newton n'expliquera jamais d'une manière satisfaisante.

Pourquoi, en effet, certaines molécules du rayon lumineux obéissent-elles à la force répulsive et sont-elles réfléchies, tandis que les autres cèdent à la force attractive et sont réfractées ? Dira-t-on, avec Newton, que, dans leur course à travers l'espace, ces molécules sont alternativement dans deux états ou *accès* qui se représentent périodiquement à des intervalles égaux ? Dans le premier de ces états, *l'accès*

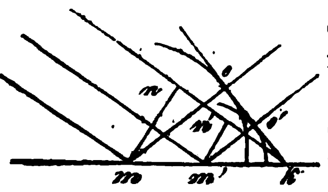
de facile réflexion, les molécules sont plus disposées à se laisser vaincre par la force répulsive; dans le second, *l'accès de facile transmission*, elles cèdent plus facilement à l'attraction : voilà pourquoi les unes se réfléchissent et les autres se réfractent, de telle sorte que le rapport de la quantité de lumière réfléchie à la quantité de lumière réfractée soit d'autant plus grand que l'incidence est plus grande et que la différence entre les indices de réfraction est plus petite.

Pour rendre raison de ces accès, Newton n'a pas reculé devant la nécessité d'admettre l'existence d'un milieu éthéré, analogue à celui d'Huygens, et dont les vibrations se propageraient avec une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière. Les vibrations éthérées s'attacheraient, en quelque sorte, aux molécules lumineuses, et les constitueraient dans l'un ou dans l'autre des deux états que nous avons désignés sous le nom d'accès, suivant que leur action seconderait ou combatterait le mouvement progressif primitif. Newton a même pris plaisir à déterminer par le calcul la force élastique dont son éther devrait être doué. Se peut-il que cet immense génie ne se soit pas aperçu que, par cette explication complexe, il ajoutait toutes les difficultés du système des ondulations aux difficultés déjà insurmontables du système de l'émission ?

Mieux inspirés, ses partisans ont eu recours à d'autres hypothèses pour défendre les accès. Nous ne dirons rien des efforts tentés à cet égard par Boscovich, par M. Melleville et après lui par M. Biot : la théorie capricieuse des accès a bien perdu de son crédit, depuis qu'il a été prouvé qu'elle ne pouvait pas se concilier avec les phénomènes mêmes qui lui avaient donné naissance, les couleurs des lames minces. Il y a plus, l'explication que cette théorie donne des faits est contradictoire dans les termes. Les molécules transmises ne sont pas toutes au maximum de l'accès de facile transmission, elles atteignent au contraire la surface dans tous les degrés ou dans toutes les phases de ce qu'on peut appeler l'accès positif. Cela posé, puisque le passage du positif au négatif suffit pour que les molécules échappent à l'effet des forces attractives, et cèdent à l'effet des forces répulsives, en perdant leur vitesse primitive pour en prendre une nouvelle en sens contraire, il est évident que la phase de l'accès doit modifier dans un certain degré l'effet de ces mêmes forces, et que la molécule, en obéissant aux forces attractives, doit subir un accroissement

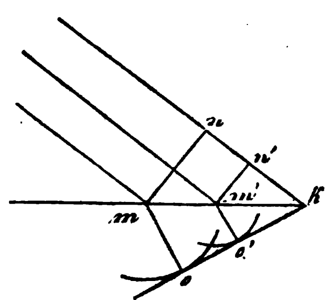
de vitesse dépendant de sa phase. Mais la vitesse de la molécule incidente ne peut pas être modifiée sans que la direction de la molécule réfractée varie. Le rayon simple, transmis et réfracté, serait donc, non pas un rayon unique, comme le montre l'expérience, mais un composé d'un nombre indéfini de rayons réfractés sous divers angles.

60. Il est donc vrai que la simultanéité, pour un même rayon, de la réflexion et de la réfraction, ne trouve aucune explication satisfaisante dans l'hypothèse de l'émission. Il en est bien autrement dans le système des ondulations : les ondes réfléchies et réfractées sont la conséquence nécessaire des ondes incidentes : l'une ne peut pas exister sans les autres. Chacune des portions de l'onde incidente, en atteignant la surface de séparation des deux milieux, devient le centre de deux nouvelles ondes, dont l'une se propagera dans le premier milieu avec la vitesse qui convient à ce milieu, tandis que l'autre se propagera dans le second milieu, avec la vitesse correspondante à son élasticité et à sa densité. Il y aura donc dans chaque milieu une infinité d'ondes partielles émanant des divers points de la surface de séparation ; et, d'après le principe de la coexistence des petits mouvements, le déplacement de chaque molécule de l'un ou l'autre milieu sera la somme de tous les déplacements que détermineraient, à ce point, les influences réunies des divers centres d'ébranlement. Les surfaces auxquelles donnent naissance ces déplacements surajoutés sont les ondes réfléchies ou réfractées, et sont évidemment les surfaces enveloppes de toutes les petites ondes sphériques. De ce seul principe, on déduit avec une extrême facilité les lois de la réflexion et de la réfraction.



Soit en effet mn le front d'une onde plane qui rencontre la surface réfléchissante en m. Chaque portion de cette onde, à mesure qu'elle rencontre la surface, devient le centre de nouvelles ondes sphériques qui se propagent dans le même milieu avec la vitesse de l'onde primitive. Ainsi, dès que la portion n a atteint la surface en k, la portion m a donné naissance à une onde sphérique dont le rayon est $mo = nk$. De même si m'

est une autre portion quelconque de l'onde, elle aura fait naître dans le même temps une nouvelle onde sphérique dont le rayon $m'o' = n'k$. La surface qui à chaque instant touche toutes ces sphères est l'onde réfléchie. Or, puisque mo et $m'o'$ sont proportionnels à mk et $m'k'$, il est évident que cette surface tangente est un plan. De plus, puisque $mo = nk$ et que les angles n et o sont droits, l'angle nmk sera égal à l'angle okm, c'est-à-dire que l'angle de réflexion sera égal à l'angle d'incidence.



S'il s'agit de la réfraction, supposons que mn est encore le front de l'onde : dans un intervalle de temps proportionnel à nk, la portion n de cette onde aura atteint la surface en k, et les portions m, m' seront devenues les centres d'ondes sphériques propagées dans le second milieu. Les rapports des rayons mo, $m'o'$ de ces sphères aux distances nk, $n'h$, seront d'ailleurs évidemment égaux au rapport unique des vitesses de propagation dans les deux milieux, et la surface tangente à toutes les sphères sera l'onde réfractée. Or, il est évident que cette surface est un plan, et que l'on aura sin nmk :: sin mko :: nk : mo, c'est-à-dire que le rapport du sinus de réfraction au sinus d'incidence est égal au rapport constant de la vitesse de l'onde réfractée à la vitesse de l'onde incidente.

61. Telle est la démonstration ingénieuse et simple que Huygens avait donnée des lois de la réflexion et de la réfraction. La formation de la grande onde ou de l'onde principale au moyen des ondes partielles ou secondaires, a été appelée le *principe d'Huygens*, et n'est évidemment qu'un cas particulier de la superposition des petits mouvements. On déduit aisément de ce mode de formation ou composition que l'onde principale est la limite extrême que l'on doit assigner à chaque instant donné au mouvement vibratoire propagé dans toutes les directions, pour que la lumière se transmette d'un point à un autre dans le moindre temps possible. Cette loi de plus rapide propagation est la loi bien connue de Fermat, et il résulte de ce que nous avons dit qu'elle a lieu quelles que soient les modi-

fications que le rayon lumineux ait subies par un nombre quelconque de réflexions et de réfractions : elle peut s'énoncer comme il suit : « La route suivie par tout rayon réfléchi ou réfracté est telle qu'elle serait parcourue dans le plus court temps possible, par un mobile qui partirait d'un point quelconque du rayon incident, pour arriver à un point quelconque du rayon réfléchi et réfracté. » Si l'on désigne par l la longueur comprise entre un point quelconque de la course du rayon incident et le point d'incidence, par l' la partie correspondante du chemin du rayon réfléchi ou réfracté, par v, v' les vitesses de propagation, les temps employés respectivement à parcourir les deux distances l, l' seront $\frac{l}{v}$, $\frac{l'}{v'}$, et leur somme $\frac{l}{v} + \frac{l'}{v'}$, ou, ce qui revient au même, la somme $l + \frac{v}{v'} l' = l + rl'$ devra être un minimum (1).

Dans le cas de la réflexion $v = v'$, $r = 1$, $l + l'$ sera un minimum. Le chemin parcouru par le rayon réfléchi sera tel par conséquent que la somme des distances des points de départ et d'arrivée

(1) Cette simple condition de minimum conduit d'ailleurs immédiatement aux lois de la réflexion et de la réfraction. Soit en effet D le point de départ du rayon, I le point d'incidence, A le point d'arrivée ; abaissons les perpendiculaires DE, AB, et posons :

$$DE = h,\ EI = x,\ EB = a,\ AB = h',$$

on aura :

$$DI = l = \sqrt{x^2 + h^2},\ AI = l' = \sqrt{(a-x)^2 + h'^2}$$
$$l + r\,l' = \sqrt{x^2 + h^2} + r\sqrt{(a-x)^2 + h'^2}$$

Et en égalant la dérivée à o pour exprimer que cette somme est un minimum, on trouvera :

$$\frac{x}{\sqrt{x^2+h^2}} + r\,\frac{a-x}{\sqrt{(a-x)^2+h'^2}} = o$$

ou, ce qui revient au même, en menant la perpendiculaire NI et appelant i et ρ les angles d'incidence DIN et de réfraction N'IA

$$\sin i - r \sin \rho = o,\ \frac{\sin i}{\sin \rho} = r$$
$$\text{si } r = 1,\ \sin i = \sin \rho,\ i = \rho.$$

à la surface réfléchissante est la plus petite possible. Le rapport constant, dans le cas du rayon réfracté, est l'indice de réfraction du second milieu.

L'intensité de la lumière, dans les ondes réfléchies et réfractées, dépend du rapport des densités de l'éther dans les deux milieux. On peut essayer de comparer les couches superposées d'éther dans ces milieux, à deux corps élastiques de masses différentes, dont l'un communique par impulsion le mouvement à l'autre. Fresnel a déduit de cette comparaison les intensités des rayons réfléchis et réfractés dans le cas de l'incidence perpendiculaire.

62. Il y a quelque chose d'étonnant dans ce fait remarquable, que deux théories aussi opposées que la théorie des ondulations et de l'émission conduisent mathématiquement aux mêmes lois. Dans toutes les deux, le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction est égal au rapport des vitesses de la lumière dans les deux milieux, et par conséquent constant. Il y a toutefois entre les deux théories une différence capitale : le rapport de ces deux sinus est égal au rapport direct des vitesses dans le système des ondulations, au rapport inverse de ces mêmes vitesses dans le système de l'émission. En d'autres termes, la vitesse de la lumière dans le milieu le plus dense est plus petite dans l'hypothèse des ondulations, plus grande dans l'hypothèse de l'émission. Les deux théories rivales sont donc en opposition directe et formelle sur un fait qu'il suffit de constater pour vider leur débat. Nous dirons bientôt, en parlant des interférences, comment ce fait a été rigoureusement constaté par M. Arago, indépendamment de la grande expérience qu'il prépare, et que le monde savant attend avec impatience. Il est certain que la vitesse de la lumière est diminuée dans un milieu plus dense, et que, par conséquent, le système de l'émission doit être définitivement rejeté.

Double réfraction. — 63. Cette mystérieuse propriété de la lumière fut découverte d'abord, vers 1669, dans le spath d'Islande, par Daniel Bartholin, qui aperçut le premier que la réfraction opérée par ce cristal partageait le rayon incident en deux autres. Sous l'incidence perpendiculaire, un de ces rayons n'éprouve aucune déviation, tandis que sous toute autre incidence il se dévie sans sortir toutefois du plan d'incidence, et se rapproche de la normale, de telle

sorte que le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction est constant et égal à 1,654. Ce rayon, qui suit les lois connues de la réfraction, est le rayon ordinaire. Pour le second rayon, au contraire, la déviation, loin de s'évanouir sous l'incidence perpendiculaire, est de 5° 12; sous d'autres incidences, les angles d'incidence et de réfraction ne sont plus dans un même plan, et la loi du sinus ne se vérifie plus; ce second rayon est le rayon extraordinaire.

Dans chaque cristal doublement réfringent, il y a une direction suivant laquelle le rayon incident ne se partage pas en se réfractant; cette direction détermine une ligne remarquable que l'on a désignée sous le nom d'axe optique; cet axe a une relation intime avec les phénomènes de la double réfraction qui se reproduisent avec la plus parfaite symétrie tout autour de lui. Dans le spath d'Islande, l'axe optique est la ligne qui joint les deux angles solides obtus du cristal; il est également incliné sur les trois faces qui comprennent cet angle. Tout rayon qui pénètre dans le cristal par une face perpendiculaire à l'axe optique se partage en deux rayons réfractés toujours compris dans le plan d'incidence, c'est-à-dire dans le plan qui passe par l'axe optique et le rayon incident. La déviation du rayon extraordinaire est la même pour tous les rayons incidents qui font un même angle avec l'axe optique, quel que soit leur azimuth: le rapport variable du sinus d'incidence au sinus de réfraction diminue à mesure que l'angle compris entre le rayon incident et l'axe optique augmente, et devient le plus petit possible lorsque le rayon incident est un angle droit. Cette plus petite valeur du rapport des sinus est ce qu'on appelle l'indice extraordinaire: pour le spath d'Islande elle est de 1,483. Les plans des angles de réfraction ordinaire et extraordinaire coïncident encore quand le rayon incident est perpendiculaire à l'axe optique; mais dans ce cas le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction du rayon extraordinaire reste constant, de sorte que les deux rayons suivent les lois de la réfraction ordinaire. Ce rapport constant est l'indice de réfraction extraordinaire dont il a été déjà question.

Dans certains cristaux, l'indice de réfraction extraordinaire est plus petit que l'indice de réfraction ordinaire: aussi le rayon extraordinaire se réfracte en s'éloignant de l'axe optique. Dans d'autres cristaux, au contraire, le rayon extraordinaire est réfracté vers

l'axe optique. On a donné à ces derniers cristaux, parmi lesquels se trouvent le quartz, le zircon, la glace (eau gelée), le nom de cristaux positifs ou attractifs. Les premiers se nomment négatifs ou répulsifs; de ce nombre sont le spath d'Islande, le saphir, le rubis, l'émeraude, le béryl, la tourmaline.

Le rayon ordinaire se meut avec une vitesse uniforme dans une substance doublement réfringente; mais la vitesse du rayon extraordinaire varie avec la position du rayon relativement à l'axe optique; elle atteint son maximum et son minimum, suivant qu'elle est perpendiculaire ou parallèle à cet axe.

M. Brewster a le premier découvert qu'un grand nombre de cristaux, et entre autres l'arragonite, le mica, le sulfate de baryte, le sulfate de chaux, la topaze et le feldspath, avaient deux axes optiques. Le premier, il a remarqué que le nombre de ces axes et l'angle qu'ils forment entre eux dépendent de la forme cristalline, et peuvent devenir par conséquent un caractère distinctif.

Les cristaux peuvent être partagés en trois grandes classes, suivant leur mode d'action sur la lumière : ils sont simplement réfringents, uni-axes ou bi-axes. Les cristaux de la première classe appartiennent tous au système tessulaire ou cubique de Mohs; les cristaux uni-axes ont pour forme primitive un rhomboèdre ou une pyramide droite. Les cristaux bi-axes appartiennent tous au système prismatique. Dans les cristaux uni-axes, l'axe optique est aussi l'axe de figure.

M. Brewster s'assura encore que le système des trois lignes que l'on obtient quand, après avoir divisé en deux parties égales les angles aigu et obtus des axes optiques, on mène une troisième ligne perpendiculaire aux bisectrices, se lie intimement avec la forme primitive du cristal, de telle sorte que si cette forme primitive est altérée par la compression mécanique ou des variations de température, le pouvoir réfringent du cristal est lui-même modifié.

En ajoutant à tout ce qui précède que l'une des deux images produites par la double réfraction paraît sensiblement plus voisine de l'œil que l'autre, et que cette distance apparente varie avec l'épaisseur du cristal et l'obliquité du rayon, nous aurons énuméré les

principaux faits relatifs à la double réfraction; arrivons aux explications qu'on en a données.

61. Huygens, qui avait déjà déduit tant de conséquences remarquables de la théorie des ondulations, étudia ce phénomène quelques années après, et assigna ses véritables lois. Il donna le moyen de déterminer, par une construction aussi élégante que simple, la direction du rayon extraordinaire. Il ne fallait rien moins que son audace ou son génie pour oser aborder de front l'une des plus grandes difficultés de la science. La construction du savant hollandais repose tout entière sur la forme des surfaces qui terminent les ondes ordinaire et extraordinaire. Huygens avait démontré que l'onde qui donne naissance au rayon ordinaire est une sphère dans le verre et les autres milieux non cristallisés, c'est-à-dire que, dans ces milieux, la vitesse de propagation du mouvement ondulatoire est la même dans toutes les directions. Voyant que, dans le spath d'Islande, l'onde qui correspond au rayon ordinaire est encore sphérique, il en conclut que la loi qui préside à la propagation du rayon extraordinaire devait s'écarter peu de cette simplicité première, et que si l'onde n'était pas une sphère, elle devait être un ellipsoïde. Construisez, avait-il dit, un ellipsoïde de révolution dont l'axe soit l'axe optique du cristal, qui ait son centre au point d'incidence, qui soit tel que, dans l'ellipse génératrice, le rapport du grand axe au petit axe soit égal au rapport du plus grand indice de réfraction au plus petit; la vitesse de chaque rayon sera dès lors représentée par celui des rayons vecteurs de l'ellipsoïde, qui a la même direction.

62. Peu satisfait, on ne sait pourquoi, de cette construction ingénieuse, Newton eut le malheur d'en substituer une autre, qu'il n'appuya d'aucune idée théorique, d'aucune expérience. L'imposante autorité du physicien anglais, la vogue inexplicable du système de l'émission, étouffèrent la voix d'Huygens. Sa belle loi fut oubliée, méconnue, jusqu'au moment ou le célèbre Young, après l'avoir déduite rigoureusement de la théorie des ondes, pressa Wollaston de la démontrer expérimentalement, et la fit adopter au monde savant tout entier comme l'expression certaine des faits. Dans un brillant mémoire couronné par l'Académie des sciences de Paris, Malus a jeté tant de lumière sur cette grande question que le doute est désormais impossible. Ainsi donc, une construction



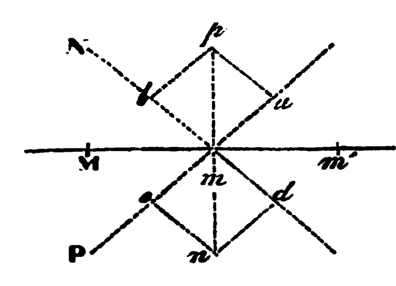
ntièrement arbitraire, fatalement opposée par Newton à la représentation exacte du phénomène, et qui, en faisant oublier une des plus curieuses lois de la nature, comprima pendant près d'un siècle le germe des plus brillantes découvertes, voilà ce que la théorie si vantée de l'émission a fait pour l'explication des phénomènes de la double réfraction.

63. Arrachée à l'oubli par Young et par Malus, devenue vivante et forte entre les mains de l'incomparable Fresnel, la théorie des ondulations a non seulement expliqué tous les faits, elle a devancé l'observation et l'expérience. Fresnel a pris pour point de départ de sa théorie deux données fondamentales. Il admet : 1° que les vibrations des molécules éthérées s'exécutent dans le plan de l'onde, perpendiculairement à l'axe du rayon ou à la ligne droite suivant laquelle le mouvement se propage ; 2° que la force élastique de l'éther mis en vibrations dans l'intérieur des milieux cristallisés, varie en général dans les diverses directions. Le principe des vibrations transversales a été énoncé d'abord par Robert Hooke en 1672, dans sa Micrographie. Le mouvement de la lumière, disait ce savant illustre, est propagé par des pulsations ou ondes qui sont à angle droit avec la direction que suit la lumière. Young, qui développa un siècle plus tard ce grand principe, en déduisit des conséquences très remarquables. MM. Cauchy, Poisson, Blanchet, ont, comme nous l'avons dit, démontré mathématiquement sa possibilité et son existence ; M. Ampère le rendait sensible, en admettant que l'éther était le fluide électrique neutre, et que la sensation de la lumière était le résultat des décompositions et recompositions que détermine, dans une série de molécules, la séparation initiale des deux molécules positive et négative dont se composait une première molécule de fluide neutre (1).

La seconde des données admises par Fresnel n'est pas moins naturelle et moins certaine que la première : c'est évidemment le cas le plus général ; l'hypothèse contraire serait une supposition particulière, dont rien ne légitimerait l'admission *à priori*. Mais d'ailleurs, soit que nous admettions que le milieu vibrant se compose

(1) Comme cette explication d'Ampère est peu connue, nous la reproduirons telle que nous l'avons écrite nous-même sous la dictée de l'illustre physicien. Concevons que deux molécules, l'une P de fluide positif, l'autre N de

des seules molécules éthérées, situées dans l'intérieur du cristal, soit que nous admettions que les molécules cristallines participent elles-mêmes au mouvement vibratoire, il est évident qu'entre ces



fluide négatif, se trouvent séparées par une cause quelconque. Pendant qu'elles seront dans un état de séparation, elles agiront sur une molécule neutre *m* composée d'une molécule positive *p* et d'une molécule négative *n*. La molécule P exercera sur *p* une répulsion que je représenterai par *m a*, sur *n* une attraction *m c*. De même la molécule N exercera sur *p* une attraction *m b*, et sur *n* une répulsion *m d*. Si on fait la composition des forces, on trouvera que la molécule *p* sera sollicitée par une force *m p* égale à la diagonale du lozange *a m b p*, construit sur les forces *m a*, *m b*, tandis que la molécule *n* sera sollicitée par une force *m n* égale et opposée à la première : les molécules *p* et *n* se sépareront donc. Elles reviendront ensuite l'une vers l'autre, dès que l'action des molécules N et P aura cessé ; mais en général, elles dépasseront leurs positions d'équilibre et exécuteront une série d'oscillations. Pendant ces oscillations, elles agiront à leur tour sur une nouvelle molécule neutre *m'*, et ainsi de suite ; en sorte qu'il s'établira une série de vibrations transversales, qui se propageront dans la direction M *m m'* perpendiculaire au sens des vibrations. Ce mode de mouvement est conforme à celui qui, suivant la théorie de Fresnel, produit la lumière. Si donc on admet que le fluide qui transmet la lumière soit précisément le fluide électrique neutre, on pourrait rendre compte des vibrations de ce fluide par des décompositions et des recompositions électriques qui, en effet, seraient transversales par rapport à la direction de la propagation.

On sera confirmé dans cette idée, si l'on observe que les conducteurs voltaïques s'échauffent et rougissent par le conflit électrique, résultat dont on rendrait alors raison en supposant que les décompositions et recompositions qui ont lieu dans ces fils, déterminent des décompositions et recompositions analogues dans le fluide neutre environnant.

On pourrait aussi concevoir le développement de la lumière dans les combinaisons chimiques énergiques. Soit pour exemple la combustion de l'hydrogène : pendant que l'hydrogène s'unit à l'oxigène pour faire de l'eau, il faut concevoir que les atmosphères des molécules d'hydrogène et d'oxigène se réunissent pour faire du fluide neutre ; mais pendant l'instant où elles sont libres, elles agissent sur le fluide neutre environnant pour y déterminer des décompositions et des recompositions, telles que nous venons de le dire, auxquelles on peut attribuer la lumière que produit la combinaison. Si l'on ad-

deux sortes de molécules il y a une telle liaison, une telle dépendance, qu'on sera forcé dans tous les cas d'admettre pour les premières ce qui est rigoureusement démontré pour les secondes, c'est-à-dire que la force élastique varie avec la direction.

64. Fresnel a démontré, avec une très grande facilité, que le phénomène de la double réfraction est une conséquence nécessaire des deux hypothèses que nous venons d'admettre. Considérons, par exemple, le simple cas d'un rayon de lumière provenant d'un point infiniment distant, et tombant perpendiculairement sur la surface d'un cristal uni-axe, taillé parallèlement à l'axe. Comme l'onde incidente est plane et parallèle à la surface du cristal, chaque vibration moléculaire sera aussi parallèle à cette même surface, et nous pouvons la concevoir décomposée en deux autres, l'une parallèle, l'autre perpendiculaire à l'axe. Cela posé, l'élasticité mise en jeu par ces deux systèmes de vibration étant différente, elles se propageront avec des vitesses différentes, et donneront naissance, dans le cristal, à deux nouvelles ondes, qui, comme nous le verrons, sont diversement polarisées. Si la seconde face du cristal est parallèle à la première, les deux rayons sortiront dans une direction normale, et l'unique effet de la réfraction aura été de retarder un des rayons. Si, au contraire, la seconde face est oblique, les deux rayons sortiront sous des directions différentes, et divergeront par conséquent.

65. Mais revenons à la théorie générale : supposons que, par suite d'un ébranlement produit dans un milieu quelconque, une molécule soit déplacée. La résultante des forces élastiques qui tend à ramener la molécule à sa position d'équilibre n'agira pas en général dans une direction directement opposée à celle du déplacement; Fresnel a toutefois démontré que dans chaque milieu il existe trois axes rectangulaires, tels que si les molécules sont déplacées dans la direction de ces axes, les forces élastiques développées agiront

mettait qu'il faut un certain degré d'intensité dans les décompositions et les recompositions des fluides électriques, pour produire la sensation de la lumière, tant que la combinaison ne serait pas assez intense, il n'y aurait que de la chaleur, ce qui s'accorde très bien avec les idées actuelles sur l'identité du principe de la chaleur et de la lumière.

en sens contraire des déplacements et suivant les mêmes lignes droites, quelles que soient d'ailleurs les lois de l'action moléculaire. Comme l'arrangement des particules cristallines est le même dans toute l'étendue du cristal pour toutes les directions parallèles, et que d'ailleurs la force élastique de l'éther semble dépendre uniquement de la constitution cristalline du milieu, il est naturel d'admettre avec Fresnel que les directions des trois axes qu'il a appelés axes d'élasticité restent les mêmes pour tous les points du milieu cristallisé.

Considérons maintenant un de ces points, et sur les trois axes d'élasticité, ainsi que sur toutes les directions passant par ce même point, portons des longueurs proportionnelles aux racines carrées des forces élastiques correspondantes; les extrémités de ces longueurs détermineront une surface que Fresnel a appelée surface d'élasticité, et à l'aide de laquelle on détermine la vitesse de propagation des ondes, quand la direction des vibrations est donnée. En effet, la force élastique étant proportionnelle au carré du rayon vecteur de la surface d'élasticité, et la vitesse de propagation des ondes dans un milieu élastique étant nécessairement proportionnelle à la racine carrée de la force élastique, cette vitesse pourra être représentée par le rayon vecteur de la surface. En appelant d'ailleurs a^2, b^2, c^2, les élasticités correspondantes aux axes, α, β, γ les angles que le rayon vecteur r fait avec ces mêmes axes, on aura :

$$r^2 = a^2 \cos^2 \alpha + b^2 \cos^2 \beta + c^2 \cos^2 \gamma.$$

Concevons maintenant une onde plane qui s'avance dans l'intérieur du cristal : en vertu du principe des vibrations transversales, le déplacement de chaque molécule sera parallèle au plan de l'onde, et Fresnel a démontré que dans ce plan il existe toujours deux directions ou axes rectangulaires, telles que si l'on décompose suivant ces axes le déplacement moléculaire, la force élastique mise en jeu par chacune des deux composantes sera normale au plan de l'onde, et ne pourra par conséquent altérer en rien la propagation des ondes auxquelles les composantes donnent naissance. Donc en réalité l'onde incidente donnera naissance dans le cristal à deux ondes seulement. Les deux axes ou directions rectangulaires, à l'aide desquelles Fresnel parvient à éliminer l'effet de la force élastique obli-



que au déplacement et variable avec la position de la molécule, sont le plus petit et le plus grand des diamètres de la section faite par le plan de l'onde dans la surface d'élasticité.

D'après ce que nous venons de dire, si l'on décompose le déplacement primitif en deux autres dirigés suivant ces axes, chacun des déplacements composants donnera naissance à une onde plane qui se propagera avec une vitesse constante, et dans laquelle les vibrations conserveront toujours la même direction. Comme d'ailleurs la vitesse de propagation de l'onde est représentée par celle du rayon vecteur de la surface d'élasticité qui est parallèle aux vibrations moléculaires, il en résulte que les vitesses de propagation des deux ondes réfractées seront proportionnelles au plus grand et au plus petit diamètre de la section faite dans la surface d'élasticité, par un plan parallèle aux vibrations du rayon incident. Les vitesses des ondes réfractées étant par là même inégales, elles se propageront suivant des directions différentes, dans l'intérieur du cristal, et la bifurcation ou le partage du rayon incident en deux rayons réfractés distincts se trouve très naturellement expliquée.

De plus, les amplitudes des vibrations composantes sont représentées par les cosinus des angles que la direction de la vibration incidente fait avec les deux axes rectangulaires ; et comme les intensités des rayons réfractés sont mesurées par les carrés des amplitudes, elles le seront aussi par les carrés des cosinus. L'on retrouve ainsi la loi admise d'abord sans preuves par Malus, mais vérifiée depuis par les belles expériences de M. Arago.

66. Quand on connaît pour toutes les directions dans l'intérieur du cristal, la vitesse de propagation de chaque onde plane, on peut déterminer facilement la forme de l'onde curviligne enveloppe de toutes ces ondes. Fresnel a appris à la déterminer par la construction suivante, aussi élégante que simple : « Concevons un ellipsoïde dont les axes soient les axes a, b, c de la surface d'élasticité, et coupons-le par une série de plans diamétraux : à partir du centre de chaque section, et sur une normale au plan diamétral correspondant, portons deux longueurs égales au plus grand et au plus petit diamètre de la section : le lieu géométrique de tous les points ainsi obtenus sera l'onde cherchée. »

Cette surface étant connue, pour avoir la direction des deux

rayons réfractés, il suffira, comme dans la construction d'Huygens, de mener deux plans tangents aux deux nappes de l'onde. Supposons, pour fixer les idées, qu'on ait construit les trois surfaces qui représentent pour un point donné les positions simultanées des ondes incidentes et réfractées; la première de ces surfaces situées dans l'air est une sphère; les deux autres, placées dans l'intérieur du cristal, sont les deux nappes de la surface déterminée par la construction de Fresnel. Prolongeons le rayon incident jusqu'à sa rencontre avec la sphère, et par le point d'intersection menons un plan tangent qui coupera la surface réfringente suivant une certaine ligne : par cette ligne, conduisons deux plans tangents aux deux nappes de l'onde réfractée; les deux droites qui joindront le centre avec les points de contact des deux plans tangents seront les directions des rayons réfractés.

Il est facile de voir que la direction du mouvement vibratoire en un point quelconque de la surface de l'onde coïncide avec la projection du rayon vecteur sur le plan qui touche la surface en ce point. Dès lors, si du centre nous abaissons des perpendiculaires sur les plans tangents aux deux nappes de l'onde, les lignes qui uniront les pieds de ces perpendiculaires avec les points de contact seront les directions des vibrations dans les deux rayons pendant que les vitesses de propagation des ondes, et les vitesses des rayons seront mesurées respectivement par les perpendiculaires et les rayons vecteurs.

L'équation de la surface de l'onde est du quatrième degré; M. Hamilton lui a donné cette forme très élégante :

$$\frac{a^2 x^2}{x^2+y^2+z^2-a^2}+\frac{b^2 y^2}{x^2+y^2+z^2-b^2}+\frac{c^2 z^2}{x^2+y^2+z^2-c^2}=0$$

Il résulte de la construction de Fresnel que dans deux directions, celles des normales aux deux sections circulaires de l'ellipsoïde d'élasticité, les deux nappes de l'onde ont un même rayon vecteur, ce qui entraîne pour les deux rayons réfractés une même vitesse. Si l'on désigne par ω, ω' les angles que le rayon vecteur mené à un point quelconque de la surface de l'onde fait avec les deux normales dont nous venons de parler, par r, r' les deux rayons vecteurs

terminés aux deux nappes de la surface, l'équation de l'onde pourra être remplacée par les deux formules suivantes :

$$\frac{1}{r^2} = \frac{1}{a^2} \sin^2 \frac{1}{2} (\omega + \omega') + \frac{1}{c^2} \cos^2 \frac{1}{2} (\omega + \omega'),$$

$$\frac{1}{r'^2} = \frac{1}{a^2} \sin^2 \frac{1}{2} (\omega - \omega') + \frac{1}{c^2} \cos^2 \frac{1}{2} (\omega - \omega')$$

qui donneront les vitesses des rayons réfractés, puisque ces vitesses sont mesurées par les rayons vecteurs r, r'. En retranchant ces deux équations l'une de l'autre, on trouve :

$$\frac{1}{r^2} - \frac{1}{r'^2} = \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{c^2}\right) \sin \omega \sin \omega'.$$

Donc si l'on divise tour à tour l'unité par les carrés des deux demi-axes de la section diamétrale de l'ellipsoïde d'élasticité, la différence de ces fractions sera proportionnelle au produit du sinus que la perpendiculaire à cette section fait avec les deux normales aux plans des sections circulaires de l'ellipsoïde, ou avec les directions dans lesquelles les deux rayons réfractés ont la même vitesse. Dans tous les cristaux connus, ces deux directions diffèrent très peu des axes optiques, et peuvent, sans erreur sensible, être supposées coïncider avec elles ; on arrive de cette manière à une loi très remarquable à laquelle M. Biot fut conduit par analogie.

Les axes optiques (qui sont aussi les lignes suivant lesquelles les deux portions de l'onde ont la même vitesse de propagation) et les lignes d'égale vitesse des rayons réfractés sont situées dans le plan des axes de plus grande et de plus petite élasticité. L'axe de plus grande élasticité divise en deux parties égales l'angle $2\,\theta$ des axes optiques, et l'angle $2\,\theta'$ des lignes d'égale vitesse ; on a d'ailleurs :

$$\text{Tang}\,\theta = \frac{\sqrt{b^2 - c^2}}{\sqrt{a^2 - b^2}} \qquad \text{tang}\,\theta' = \frac{a\sqrt{b^2 - c^2}}{c\sqrt{a^2 - b^2}}$$

Si $b = c$ ou $b = a$, on a $\theta = 0$, $\theta' = 0$, ou $\theta = 90°$, $\theta' = 90°$; les deux axes optiques se confondent et coïncident dans le premier cas avec l'axe de plus grande élasticité ; dans le second, avec l'axe de plus petite élasticité. Alors aussi $\omega = \omega'$ et les équations de la surface de l'onde deviennent

$$\frac{1}{r^2} = \frac{1}{a^2}\sin^2\omega + \frac{1}{b^2}\cos^2\omega, \quad \frac{1}{r'^2} = c^2$$

La première équation représente un ellipsoïde de révolution, et la seconde une sphère. La surface de l'onde dans les cristaux à un axe est donc réellement formée, comme l'admettait Huygens, d'une sphère et d'un ellipsoïde de révolution.

Si les trois axes d'élasticité étaient égaux, la surface de l'onde se réduirait à une sphère unique, la vitesse de l'onde et du rayon serait la même dans toutes les directions : la loi de la réfraction simple est la loi connue de Snellius.

67. Même après la découverte des cristaux à deux axes, on avait supposé que la vitesse de l'un des rayons réfractés restait constante, et que, par conséquent, ce rayon suivait la loi ordinaire des sinus, la théorie de Fresnel, au contraire, forçait à admettre que la vitesse des deux rayons varie avec la direction, et que tous deux, par conséquent, se réfractent suivant une loi toute nouvelle. Cette conclusion étant trop remarquable pour qu'on pût négliger de la vérifier par l'expérience, le monde savant attachait le plus vif intérêt à cette vérification, qui devait décider du sort de la théorie nouvelle. La gloire de l'expérience, comme la gloire de la théorie, appartient tout entière à Fresnel. Par une méthode que nous indiquerons plus tard, il mesura directement la vitesse des deux rayons dans des lames de topaze taillées suivant des directions différentes par rapport à leurs axes, et la trouva variable. Il prit encore deux prismes taillés dans le même cristal de topaze, mais dans des directions différentes ; il les souda face à face, en sorte que leurs bases se trouvaient dans un même plan, et leurs arêtes en ligne droite, puis il les polit soigneusement, afin de rendre leurs angles tout-à-fait égaux. Le prisme composé ainsi formé fut achromatisé par un prisme de verre; et en regardant à travers cet ensemble une ligne lumineuse, on observa que l'image la moins réfractée, c'est à-dire l'image appelée ordinaire, plus déviée dans l'un que dans l'autre prisme, paraissait rompue à leur jointure; il fallait nécessairement en conclure que le rayon est inégalement réfracté dans les différentes directions. Lorsque, des deux plans des angles réfringents dans les deux cristaux, l'un était parallèle, l'autre perpendiculaire

au plan de la section principale, c'est-à-dire au plan de la section correspondante à l'axe moyen d'élasticité, les deux images les plus réfractées, c'est-à-dire les deux images extraordinaires, formaient une ligne continue, et par conséquent les deux rayons étaient dans ce cas également réfractés; et c'est précisément ce que le calcul indiquait *à priori*.

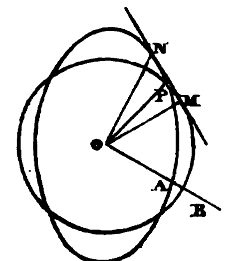
68. Cette théorie a rendu réellement compte de tous les faits; elle a été aussi heureuse et féconde que la théorie de l'émission a été ingrate et stérile. Elle s'applique très bien à la différence indiquée par l'expérience entre les cristaux positifs et négatifs. Elle nous apprend que les cristaux positifs sont ceux pour lesquels l'axe de révolution de l'ellipsoïde de Huygens étant le grand axe de l'ellipse génératrice, l'ellipsoïde est allongé au lieu d'être aplati à ses pôles.

Quant à la distinction des cristaux simplement réfringents, uniaxes ou bi-axes, on comprend facilement, 1° que comme, dans le système cubique, on peut toujours assigner trois directions ou axes rectangulaires autour desquels la figure est parfaitement symétrique, il est naturel de penser que la densité et l'élasticité du milieu éthéré restent les mêmes suivant les trois axes, et par suite dans toute l'étendue du cristal, ce qui entraîne la réfraction simple; 2° qu'au contraire, comme dans le système rhomboédrique qui a pour forme primitive un rhomboèdre ou une pyramide droite, il n'y a qu'un axe de figure, qu'une seule ligne autour de laquelle tout reste symétrique, on peut admettre raisonnablement que l'élasticité du cristal est plus grande ou plus petite dans cette direction que dans les autres, tandis qu'elle est égale dans toutes les directions perpendiculaires à la première; de là vient la double réfraction qui a pour axe l'axe de figure; 3° enfin, dans le système pyramidal, qui a pour forme primitive une pyramide oblique, il n'y a plus d'axe de figure: tout porte à croire que la densité du cristal, et par conséquent l'élasticité du milieu, est inégale dans toutes les directions. Or c'est réellement le cas des cristaux à deux axes.

Dans ces dernières années, deux conséquences remarquables des calculs de Fresnel sont devenues l'occasion de deux expériences complétement neuves, et qui fournissent une preuve frappante, irrécusable, de la vérité de la théorie des ondulations : nous voulons parler des phénomènes de la réfraction conique.

69. *Réfraction conique.* — Si, pour obtenir l'intersection de la surface de l'onde avec l'un des plans coordonnés, le plan $z\,x$ par exemple, on fait dans son équation $y = o$, il viendra :

$$(x^2 + z^2 - b^2)\,(a^2\,x^2 + c^2\,z^2 - a^2\,c^2) = o.$$



Cette dernière équation se décompose dans les deux suivantes :

$$x^2 + z^2 = b^2,\ a^2\,x^2 + c^2\,z^2 - a^2\,c^2 = o,$$

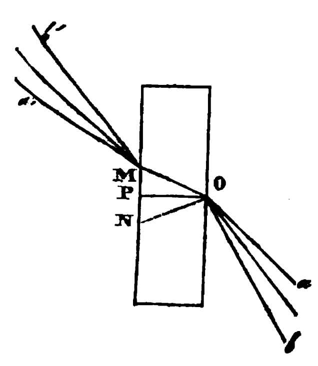
et donne, pour l'intersection cherchée, l'ensemble d'un cercle et d'une ellipse. Ces deux courbes, qui ont un centre commun, se couperont nécessairement en quatre points, puisque le rayon du cercle est intermédiaire entre les deux axes de l'ellipse. Pour ces points d'intersection, les deux rayons vecteurs de la surface de l'onde se réduiront à un seul, et par conséquent les ondes lumineuses déterminées par les rayons qui pénètrent le cristal dans la direction de ces rayons vecteurs, auront même vitesse. Leurs directions à l'émergence seront d'ailleurs déterminées par la direction des deux tangentes menées au cercle et à l'ellipse par le point d'intersection P. Comme il n'y a que deux tangentes, il semble qu'il ne doive y avoir à la sortie que deux ondes planes, comme Fresnel lui-même l'avait cru. Mais M. W. Hamilton démontra plus tard par l'analyse que le point P est le point d'intersection de chacun des systèmes de deux courbes dont se composent les diverses coupes faites dans la surface de l'onde par les plans menés suivant le rayon vecteur O P. Dès lors, au lieu de deux tangentes, on aura un cône du second degré tangent à la surface, au point singulier P ; et par conséquent, tout rayon qui pénétrera la surface dans la direction O P devra nécessairement s'épanouir à la sortie, et former un cône lumineux en se partageant en autant de rayons qu'il y a de tangentes.

Ce n'est pas tout encore : le cercle et l'ellipse ont quatre tangentes communes, telles que MN, et les plans menés par ces tangentes perpendiculairement à la section, sont nécessairement perpendiculaires aux axes optiques du cristal. Fresnel semble avoir cru que chacun de ces plans touchait la surface en deux points seulement

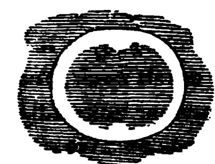
et il en concluait que tout rayon tombant sur un cristal à deux axes, de telle sorte que l'un des rayons réfractés coïncidât avec un axe optique OM, devait se diviser dans l'intérieur du cristal en deux rayons OM, OM′ aboutissant au point où la surface rencontre le plan tangent mené par le point M perpendiculairement à l'axe optique. Or, M. Hamilton découvrit que les quatre plans dont nous avons parlé ne touchaient pas seulement la surface de l'onde en deux points, mais dans un nombre infini de points constituant pour chacun d'eux un petit cercle de contact; et il en résultait qu'un rayon de lumière ordinaire arrivant de l'extérieur dans la direction assignée, devait se partager dans l'intérieur des cristaux en un nombre infini de rayons réfractés.

70. M. Hamilton avait donc déduit de la théorie de Fresnel deux conséquences non seulement inattendues, mais inconciliables avec tous les faits observés jusque là, mais contraires à tout ce que par analogie on aurait pu déduire de l'expérience. Ces deux conclusions, que la plus subtile analyse avait seule mises en évidence, paraissaient si extraordinaires, si singulières même, qu'on se sentait naturellement porté à rejeter la théorie qui leur avait donné naissance, et il fallait nécessairement reconnaître que leur réalisation, que l'accord du calcul et des faits serait la preuve de la théorie la plus certaine, la plus frappante qu'on pût imaginer. Inquiet de la portée de ses calculs, M. Hamilton pressa vivement son ami, M. Lloyd, de soumettre la théorie des ondulations à cette rude épreuve, de demander à l'expérience un jugement en dernier ressort. Les premiers essais du physicien irlandais ne furent pas couronnés de succès; les cristaux qu'il avait à sa disposition étaient trop petits pour qu'on pût rien observer. Ce fut seulement lorsqu'il eut obtenu de Dollond un grand cristal d'arragonite, qu'il put constater et rendre évidente aux yeux les plus prévenus l'existence de la double réfraction conique dont nous venons de parler.

La première, que M. Hamilton a nommée extérieure, devait, comme on l'a vu, se manifester au passage à travers le cristal d'un rayon lumineux dirigé dans le sens d'une des lignes d'égale vitesse. Ces lignes coïncident presque avec les axes optiques du cristal et comprennent dans l'arragonite un angle d'environ 20°. La plaque dont M. Lloyd se servit avait ses faces perpendiculaires à la ligne



qui divise en deux parties égales l'angle des axes optiques, de sorte que les lignes d'égale vitesse faisaient de chaque côté de la perpendiculaire des angles d'environ 10°. Soient OM et ON ces lignes également inclinées sur la normale OP : un rayon de lumière traversant la plaque dans la direction OM ou MO, devait, au point d'émergence, former un cône lumineux O*ab*, ou M*a′b′*, dont l'angle au sommet dépendant des axes d'élasticité est pour l'arragonite de près de 3 degrés. Une lame métallique très mince et percée d'une petite ouverture fut appliquée sur chaque face du cristal, de manière que la ligne de jonction des deux ouvertures fût parallèle à MO. On approcha ensuite la flamme d'une lampe, placée de manière que la partie centrale du faisceau convergent vers l'ouverture de la première face fit un angle d'incidence de 15 ou 16 degrés. L'appareil étant ainsi disposé, on voyait paraître, en regardant par l'autre ouverture, un anneau brillant de lumière, comme

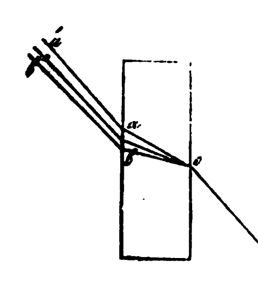


l'indique la figure ci-jointe. Quand la ligne des ouvertures n'avait plus la direction MO, le phénomène changeait brusquement, et l'anneau se transformait dans les deux faisceaux dont se compose ordinairement le rayon réfracté. M. Lloyd répéta les mêmes expériences avec la lumière solaire, et parvint à observer la section du cône lumineux à différentes distances du sommet.

Lorsque, dans le cas où la ligne qui joint les deux ouvertures avait la direction OM, on substituait sur la face voisine de la lampe une petite ouverture linéaire à l'ouverture circulaire, on remarquait dans les phénomènes observés des variations remarquables. Quand le plan déterminé par les deux ouvertures, dont la première était une petite ligne, coïncidait avec celui des axes optiques, d'après les idées reçues jusqu'alors, tous les rayons transmis par la seconde ouverture devaient subir une double réfraction dans le plan même des axes optiques, de manière à ne laisser apercevoir aucune diffé-

rence de largeur dans toute l'étendue de la ligne lumineuse émergente. D'après M. Hamilton, au contraire, le rayon transmis suivant la direction OM, devait être réfracté dans tous les plans : c'est précisément ce qui eut lieu, car, dans le voisinage de chacun des axes optiques, on remarquait sur la ligne lumineuse observée un renflement terminé du côté des axes optiques par une courbe ovale. Il était facile de voir que cette courbe n'était autre que la conchoïde de Nicomède, ayant précisément pour asymptote la ligne optique tracée sur la première surface.

71. La seconde réfraction conique, appelée intérieure par M. Hamilton, devait se produire toutes les fois qu'un rayon extérieur tomberait sur un cristal à deux axes dans une direction telle que l'un des rayons réfractés coïncidât avec un axe optique. Le rayon incident devait alors s'épanouir dans l'intérieur du cristal, en un cône dont l'angle au sommet fût pour l'arragonite de 1° 55′. De plus, les rayons dont l'ensemble forme le cône devaient subir à la face de sortie une réfraction qui, les rendant parallèles au rayon incident, en fît un cylindre ayant pour base la section faite dans le cône par la face d'émergence. La petite étendue du cône, la difficulté de donner exactement au rayon incident la direction qu'il devait avoir, tout contribuait à rendre presque impossible l'apparition du phénomène. M. Lloyd essaya néanmoins avec confiance ; il fit tomber sur le cristal un rayon très étroit parti d'une lampe placée à distance, et dont la direction variait par degrés tout-à-fait insensibles : dès qu'on avait atteint la position indiquée par la théorie, les deux rayons réfractés s'épanouissaient subitement en un cercle continu dont le diamètre était égal à la distance primitive des deux rayons réfractés. On refit l'expérience avec la lumière solaire ; la section du faisceau émergent fut reçue à diverses distances sur de petits écrans de papier argenté : elle parut toujours circulaire et sensiblement égale, ce qui prouvait bien que ce faisceau était un cylindre lumineux ; on put observer et mesurer l'angle du cône formé dans le cristal, il était à très peu près ce qu'avait indiqué la théorie ; on trouva 1° 50′ au lieu de 1° 55′.



72. Ces curieuses expériences ont été répétées partout, à l'exception peut-être de la France, qui cependant devait prendre d'autant plus d'intérêt à ces recherches qu'elles étaient le plus beau fleuron de la couronne de son Fresnel. Il est triste de voir qu'au lieu de déposer généreusement les armes, les partisans du système de l'émission soient presque parvenus à oublier et à faire oublier une des plus belles conquêtes de la science moderne. « Aucune expérience physique, disait M. Plucker, dans son admirable mémoire sur la forme générale des ondes lumineuses (1), n'a fait autant d'impression sur mon esprit que la réfraction conique. Un rayon de lumière unique entrant dans un cristal et sortant sous l'aspect d'un cône lumineux, c'était une chose inouïe et sans analogie. M. Hamilton l'annonça en partant de la forme de l'onde, qui avait été déduite par de longs calculs d'une théorie abstraite. J'avoue que j'aurais désespéré de voir confirmer par l'expérience un résultat si extraordinaire, prédit par la seule théorie que le génie de Fresnel avait nouvellement créée. Mais M. Lloyd ayant démontré que les expériences étaient en parfaite concordance avec les prédictions de M. Hamilton, tout préjugé contre une théorie si merveilleusement soutenue a dû disparaître. »

Comment, en effet, résister à cette accablante argumentation? Si le système de l'émission est vrai, si la théorie de Fresnel est une chimère, la surface de l'onde est imaginaire; il n'existe pour elle ni point singulier, ni cône lieu géométrique d'une infinité de tangentes, ni plan tangent qui la rencontre suivant un cercle. Il sera absurde même de penser que le rayon émergent s'épanouisse suivant un cône dont les arêtes n'existent pas; la réfraction conique, en un mot, sera une absurdité; et cependant elle a été constatée, et l'épanouissement de lumière a été observé par tous ceux qui ont voulu le voir; donc le cône et le plan tangent sont des faits, donc la surface de l'onde est réelle, donc le système de l'émission est une assertion gratuite incompatible avec des phénomènes certains, donc le système des ondulations est seul vrai, et mérite seul d'occuper un esprit raisonnable.

73. M. Poggendorff a indiqué en 1839, dans ses *Annales*, t. XLVIII,

(1) Journal de mathématiques pures et appliquées de Crelle, tome XIX, page 44.

pag. 462, un moyen beaucoup plus facile d'observer la réfraction conique intérieure. On prend une plaque d'arragonite, aussi homogène qu'il est possible, et taillee, comme nous l'avons dit, perpendiculairement à l'axe moyen ou à la ligne qui divise en deux parties égales l'angle des axes optiques; on couvre l'une des faces d'une petite feuille d'étain percée d'un trou rond à l'aide d'une aiguille très fine, puis sur l'autre face, à une distance convenable, on adapte une loupe. Si l'on dirige l'appareil ainsi disposé vers un ciel pur, ou vers la flamme intense d'une lampe, on aperçoit généralement deux images de la petite ouverture circulaire; mais en déplaçant un peu l'œil tout alentour, on rencontre bientôt le point où les deux images se confondent et se transforment en un cercle très brillant. M. Poggendorf a remarqué, dans chacune des images de l'ouverture, un point noir qui, dans l'anneau lumineux, donnait naissance à un cercle obscur et très délié. M. Plateau a de plus souvent cru voir dans ce même anneau de petites lignes lumineuses très fines, ayant la forme de rayons émanant du centre.

74. Avant de terminer ce qui regarde la double réfraction, disons les remarquables progrès qu'a faits dans ces dernières années l'étude de la surface de l'onde. On sait que Fresnel a donné deux constructions isolées de cette surface, l'une par l'ensemble des plans tangents, l'autre par la détermination d'un nombre indéfini de points isolés. Ces deux constructions, ainsi que toutes celles que l'on a indiquées jusqu'ici, reposent sur la considération des deux ellipsoïdes :

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}+\frac{c^2}{z^2}=1,\quad a^2x^2+b^2y^2+c^2z^2=1$$

a^2, b^2, c^2 sont les élasticités dans le sens des trois axes d'élasticité.

M. Magnus a prouvé par un calcul très simple que si du centre l'on abaisse des perpendiculaires sur les plans tangents du premier ellipsoïde, le lieu géométrique des pieds de ces pendiculaires est la surface d'élasticité.

M. Plucker a démontré depuis que les longueurs des rayons vecteurs de la surface d'élasticité et du second ellipsoïde, dont les directions coïncident avec une même ligne droite quelconque, sont l'inverse de l'autre, de sorte que leur produit est égal à l'unité.

Fresnel avait dit : «Qu'on fasse passer un plan quelconque par le centre du second ellipsoïde, et qu'on élève à ce plan des perpendiculaires égales à l'unité divisée tour à tour par les deux demi-axes de l'ellipse d'intersection, les plans parallèles au plan sécant, et passant par les extrémités de ces perpendiculaires, sont tangents à l'onde lumineuse.» C'est la construction de la surface de l'onde par les plans tangents.

Il avait dit encore : « Après avoir coupé le premier ellipsoïde par un plan diamétral, menez à partir du centre deux droites perpendiculaires à ce plan et respectivement égales au plus grand et au plus petit diamètre de l'ellipse d'intersection : le lieu des extrémités de ces perpendiculaires sera la surface de l'onde lumineuse.» C'est la construction par points de cette même surface.

Fresnel avait jugé impraticables les calculs nécessaires pour lier la seconde construction à la première. M. Ampère, remplissant cette lacune, déduisit le premier d'une manière rigoureuse l'équation de l'onde en coordonnées ordinaires.

M. Plucker, dans une note qui fait suite au beau mémoire que nous avons déjà cité, indique une nouvelle construction qui, renfermant à la fois les deux constructions de Fresnel, rend inutiles les calculs immenses de M. Ampère. En un point quelconque M de la surface du premier ellipsoïde, construisez le plan tangent, et abaissez du centre O une perpendiculaire OP sur ce plan. Faites tourner ensuite le triangle MOP dans son propre plan, autour du centre O, de manière qu'il décrive un angle de 90°. Dans la position nouvelle du triangle MOP, le point M appartiendra à la surface de l'onde lumineuse, tandis que le plan perpendiculaire à OP en P, plan qui dans la position primitive du triangle touchait l'ellipsoïde, sera tangent à l'onde en M. Enfin, le plan même du triangle sera le plan de vibration.

Cette si élégante construction repose sur des considérations de la plus extrême simplicité ; on peut en bannir jusqu'à la dernière trace du calcul, en remplaçant par des considérations directes les développements analytiques qui avaient conduit à la solution du problème suivant : un ellipsoïde et un de ses points M étant donnés, conduire par ce point un plan diamétral tel que l'un des deux axes de l'ellipse d'intersection se confonde avec OM. Voici com-

ment M. Plucker résout synthétiquement ce problème: Les tangentes en M à chacune des ellipses d'intersection, dont le plan passe par le rayon vecteur OM, forment en général des angles différents; dans l'ellipse à construire cet angle est droit. Chaque ligne droite qui, dans le plan tangent à l'ellipsoïde en M, passe par ce point, est du nombre des tangentes en question; il s'agit donc de choisir parmi ces droites celle qui est perpendiculaire au rayon vecteur OM. Pour cela, abaissons du centre O une perpendiculaire OP sur le plan tangent, joignons les deux points M et P par une ligne droite MP et menons par M, dans le plan tangent, une droite perpendiculaire à MP. Cette ligne droite sera la tangente demandée. L'on n'aura donc qu'à faire passer un plan par le rayon vecteur OM, et la ligne droite que nous venons de construire, pour que ce rayon vecteur coïncide avec un des deux axes de l'ellipse d'intersection. Pour de plus amples développements, voyez le *Journal de Crelle*, tome XIX, pages 1 et 91.

Dans un travail présenté à l'Institut le 20 mai 1839, et qui vient d'être publié dans les *Mémoires de l'Académie des sciences*, M. Cauchy indique une méthode analytique très simple qui fournit immédiatement l'équation de la surface de l'onde. Ce travail, qui a pour titre *Mémoire sur la polarisation rectiligne et la double réfraction*, n'est pas susceptible d'analyse. Arrivons enfin à une nouvelle série de phénomènes, à la polarisation.

75. *Polarisation.* — Dans le cours de ses recherches, Huygens s'aperçut le premier que lorsqu'on faisait passer à travers un second rhombe d'Islande les rayons obtenus par la double réfraction, les deux rayons auxquels chacun d'eux donne naissance ont des intensités bien différentes; leur clarté relative dépend de la position du second rhombe par rapport au premier; dans deux positions, l'un de ces rayons s'évanouit; ces deux positions sont précisément celles dans lesquelles les sections principales des deux cristaux sont parallèles ou perpendiculaires. Lorsque les sections sont parallèles, le rayon qui, dans le premier cristal, a suivi les lois de la réfraction ordinaire est réfracté ordinairement, tandis que le rayon extraordinaire est de nouveau réfracté extraordinairement. C'est le contraire quand les deux sections principales sont perpendiculaires; dans ce cas, le rayon ordinaire subit la réfraction extraordinaire, et le rayon

extraordinaire se réfracte ordinairement. Dans toute position intermédiaire, chacun des rayons réfractés par le premier cristal se divise en deux autres d'intensités tout-à-fait inégales, et proportionnelles au carré du cosinus de la distance angulaire qui sépare la section principale de la position de plus grande intensité.

Il résulte évidemment de cette observation inattendue que les rayons réfractés obtenus à l'aide du premier rhombe sont doués de propriétés nouvelles qui les distinguent totalement des rayons solaires ordinaires; on dirait qu'ils ont acquis des *côtés* ou des pôles par lesquels ils sont plus ou moins transmissibles. Leur réfraction ultérieure dépend de la position par rapport à ces côtés ou à ces pôles de certaines faces planes situées dans l'intérieur du cristal. Telle est la conséquence que Newton tira le premier de l'observation d'Huygens: « Ce fait, disait-il, suppose dans les *côtés* du rayon une vertu de disposition qui a des rapports de correspondance ou de sympathie avec une vertu ou une disposition corrélative du cristal; c'est ainsi que les pôles de deux aimans se correspondent mutuellement. »

76. Quoique le fait découvert par Huygens fût de nature à exciter le plus vif intérêt; quoiqu'il eût paru à Newton d'une importance assez grande pour qu'on dût en conclure l'existence dans les rayons lumineux de propriétés merveilleuses qu'on n'avait pas même soupçonnées, il resta pendant plus de cent ans un fait isolé dans la science, et l'on ignora jusqu'au commencement de ce siècle les propriétés que la lumière acquiert dans un degré plus ou moins grand, lorsqu'on lui fait subir une modification quelconque.

En 1808, Malus dirigea par hasard un prisme doublement réfringent vers les fenêtres du palais du Luxembourg, alors qu'elles réfléchissaient les rayons du soleil couchant, et il fut tout étonné de voir, en tournant le prisme, que l'image ordinaire de la fenêtre disparaissait presque dans deux positions opposées, tandis que dans deux autres positions, situées à 90 degrés des premières, c'était l'image extraordinaire qui s'évanouissait. Frappé de l'analogie qui existait entre ce phénomène et le fait observé par Huygens, Malus crut que le passage à travers l'atmosphère communiquait à la lumière les mêmes propriétés que le passage à travers un rhombe d'Islande. Abandonnant bientôt cette idée, il s'assura que la réflexion

était la véritable cause du phénomène qu'il avait observé; et en étudiant avec le plus grand soin les circonstances nécessaires à sa production, il arriva à cette proposition fondamentale; « Lorsque la lumière est réfléchie sous certains angles par la surface du verre, de l'eau, ou d'un milieu transparent quelconque, il revêt les mêmes caractères que s'il avait subi la double réfraction. » Si le rayon ainsi réfléchi vient tomber sur un prisme doublement réfringent, un des deux faisceaux dans lesquels il est généralement divisé s'évanouit dans deux positions du rhombe, c'est-à-dire lorsque la section principale du cristal est parallèle ou perpendiculaire au plan de réflexion. Dans les positions intermédiaires, les deux rayons passent par tous les degrés d'intensité.

77. Un rayon de lumière semble donc acquérir des côtés ou des pôles quand il est réfléchi sous un certain angle par un milieu transparent, ou quand il a subi la double réfraction, et l'on dit alors qu'il est *polarisé*. Le *plan de polarisation* est celui dans lequel le rayon a dû se réfléchir pour être polarisé; il doit être considéré comme un des côtés du rayon polarisé, et on le détermine expérimentalement par ses relations avec la section principale d'un cristal doublement réfringent, puisque le rayon subit la seule réfraction ordinaire quand la section principale est parallèle au plan de polarisation.

En général, lorsqu'un rayon de lumière venu directement d'un corps lumineux par lui-même, est réfléchi par une surface sous un certain angle, l'intensité du rayon réfléchi restera la même que la surface, soit au-dessus ou au-dessous, à la droite ou à la gauche du rayon incident. Mais si au lieu d'un rayon direct on fait réfléchir un rayon polarisé par une des méthodes que nous avons indiquées, le côté par lequel le plan se présente au rayon n'est plus indifférent; l'inclinaison du rayon réfléchi reste toujours la même quel que soit ce côté, mais son intensité sera très différente; le rayon qui est réfléchi avec l'intensité maximum, quand la nouvelle surface se présente par un côté sous un certain angle, sera entièrement transmis si elle se présente par le côté opposé, toutes les autres circonstances restant les mêmes.

78. Le rayon polarisé retient indéfiniment ses pôles ou côtés, et tant qu'il ne sera pas modifié par une nouvelle réflexion ou réfraction, il conservera dans tout le reste de sa route certaines relations

avec l'espace environnant. On le distingue d'un rayon non polarisé à l'aide des caractères suivants :

1° Il n'est pas divisé en deux faisceaux par un cristal doublement réfringent dans deux certaines positions de la section principale de ce cristal : il subit la seule réfraction ordinaire ou la seule réfraction extraordinaire, suivant que la section principale est parallèle ou perpendiculaire au plan de polarisation. Dans toute autre position du cristal, la réfraction est double et l'intensité des rayons réfractés varie avec cette position.

2° Il n'est pas réfléchi par la surface polie d'un milieu transparent, si cette surface se présente à lui sous un certain angle, et de telle sorte que le plan d'incidence soit perpendiculaire au plan de polarisation ; tandis qu'il est partiellement réfléchi, si la surface réfléchissante se présente sous un autre angle et dans un autre plan d'incidence.

3° Il n'est pas transmis par une plaque de tourmaline dont l'axe est parallèle au plan de polarisation, tandis qu'il est transmis avec une intensité croissante, lorsque l'axe du cristal tourne.

Ces propriétés, qui sont essentielles au rayon polarisé, et qui lui appartiennent exclusivement, le feront partout reconnaître.

79. Malus trouva que toutes les surfaces réfléchissantes, à l'exception des métaux, polarisaient la lumière, et que l'angle de polarisation variait avec les diverses substances : il n'alla pas plus loin. Il était réservé à M. Brewster de découvrir qu'il existe une liaison nécessaire entre les pouvoirs polarisants et réfringents d'une substance donnée ; il démontra, en 1811, que l'indice de réfraction est la tangente de l'angle de polarisation. Dès lors, quand l'indice de réfraction est connu, on peut trouver immédiatement l'angle de polarisation, et réciproquement. La belle loi de Brewster peut encore s'énoncer comme il suit : L'angle de polarisation est tel, que le rayon réfléchi et le rayon réfracté forment entre eux un angle droit. Désignons, en effet, par e l'indice de réfraction, par $p = i$, ρ, et r les angles de polarisation et à la fois d'incidence, de réfraction, et de réflexion, on aura :

$$e = \frac{\sin i}{\sin \rho} = \frac{\sin p}{\sin \rho} = \operatorname{tang} p, \text{ou } \frac{\sin p}{\cos p} = \frac{\sin p}{\sin \rho}$$

et par conséquent,

$$\cos p = \sin \rho, \; p + \rho = 90°;$$

or, l'angle de réflexion r, est égal à l'angle d'incidence p, donc $r+\rho=90°$; le rayon réfléchi est perpendiculaire au rayon réfracté.

80. La loi de Brewster s'applique au cas où la lumière est réfléchie par la surface d'un milieu plus rare, comme au cas où elle est réfléchie par la surface d'un milieu plus dense. Il en résulte que les deux angles de polarisation à la surface de séparation des deux mêmes milieux, sont compléments l'un de l'autre; car l'indice de réfraction au passage du milieu plus dense dans le milieu moins dense est réciproquement proportionnel à l'indice de réfraction au passage du milieu moins dense dans un milieu plus dense, et par conséquent les tangentes des angles de polarisation, proportionnelles à ces indices de réfraction, seront elles-mêmes inversement proportionnelles: la tangente d'un des angles sera la cotangente de l'autre; la somme des deux angles formera un angle droit.

Il en résulte que si un rayon de lumière tombe sur un milieu terminé par deux plans parallèles sous l'angle de polarisation, la portion de ce rayon qui pénétrera dans le milieu rencontrera aussi la seconde surface sous l'angle de polarisation, et sera par conséquent complétement polarisée par réflexion. En effet, puisque le rayon rencontre la première surface sous l'angle de polarisation, l'angle de réfraction sera le complément de l'angle d'incidence, et sera par conséquent égal à l'angle de polarisation à la seconde surface. Mais puisque les deux surfaces sont parallèles, l'angle de réfraction à la première est égal à l'angle d'incidence à la seconde; donc ce dernier angle est précisément l'angle de polarisation à la seconde surface.

On conclut encore des mêmes principes que si plusieurs plaques de verre ou d'un milieu transparent quelconque, étant disposées parallèlement les unes aux autres, un rayon de lumière tombe sur la première surface sous l'angle de polarisation, les portions de ce rayon qui atteindront les autres surfaces les rencontreront toujours sous l'angle de polarisation, de sorte que celles qui seront réfléchies seront complétement polarisées.

81. Nous avons vu que lorsqu'un rayon de lumière polarisé par réflexion vient à rencontrer une seconde surface réfléchissante sous l'angle de polarisation, l'intensité du rayon deux fois réfléchi varie avec l'inclinaison des deux plans de réflexion. Elle est la plus grande

possible quand ces deux plans coïncident, elle est nulle quand ils sont perpendiculaires. Dans tous les cas, cette intensité varie comme le carré du cosinus de l'angle formé par les deux plans de réflexion. Cette loi, découverte par Malus, a été vérifiée expérimentalement par M. Arago.

On en conclut qu'un rayon de lumière ordinaire peut être considéré comme formé de deux autres rayons polarisés, d'intensités égales, et dont les plans de polarisation sont perpendiculaires l'un à l'autre. En effet, si l'on désigne par I l'intensité commune, par α l'angle que le plan de réflexion fait avec le plan de polarisation de l'un des rayons, $90° - \alpha$ sera l'angle compris entre le plan de réflexion et le plan de polarisation du second rayon ; les intensités des deux rayons réfléchis seront $I \cos^2 \alpha$ et $I \cos^2 (90° - \alpha) = I \sin^2 \alpha$; leur somme, ou l'intensité totale du rayon réfléchi $I \cos^2 \alpha + I \sin^2 \alpha = I$, est constante et indépendante de l'angle α ou de la position du plan de réflexion par rapport au rayon ; or, tel est précisément le caractère de la lumière ordinaire ; donc l'ensemble des deux rayons d'égale intensité et polarisés à angle droit, est de la lumière commune, ou non polarisée.

82. Malus observa que lorsqu'un rayon rencontre une surface sous un angle plus grand ou plus petit que l'angle de polarisation, il se revêt seulement en partie des propriétés déjà décrites ; aucun des deux rayons dans lesquels un rhombe d'Islande le partage, ne s'évanouit entièrement ; leur intensité varie seulement entre certaines limites d'autant plus resserrées que l'angle de polarisation diffère plus de l'angle d'incidence. Il semble donc qu'une portion seulement du rayon réfléchi a subi les modifications exprimées par le mot de polarisation ; cette portion polarisée croîtrait à mesure que l'angle d'incidence approche de l'angle de polarisation ; l'autre portion du rayon resterait à l'état de lumière commune. Suivant Malus, la lumière partiellement polarisée se composerait de lumière commune et de lumière entièrement polarisée.

Si de la lumière partiellement polarisée est réfléchie par une seconde surface dans le même plan, et sous le même angle, le rayon réfléchi contiendra une plus grande quantité de lumière polarisée, et en multipliant suffisamment les reflexions successives, la lumière finira par être complétement polarisée. Ce fait fut découvert par

M. Brewster, qui prouva que la lumière peut être polarisée sous toute incidence, par un nombre suffisant de réflexions. Le nombre des réflexions doit être d'autant plus grand, que l'angle d'incidence diffère plus de l'angle de polarisation.

83 Il nous reste à dire quelques mots sur les modifications que la réfraction fait subir à la lumiere.

Lorsqu'un rayon de lumiere commune tombe sur une plaque de verre, il est toujours en partie réfracté, et l'on trouve que cette portion transmise est partiellement polarisée. La quantité de lumière polarisée dans le rayon réfracté croit avec l'incidence; elle est nulle sous une incidence perpendiculaire, et d'autant plus grande que la lumière tombe plus obliquement. Le plan de polarisation ne coïncide pas d'ailleurs avec le plan d'incidence, comme dans le cas de la réflexion; il lui est au contraire perpendiculaire.

Le rapport entre la lumière polarisée par réfraction et la lumière polarisée par réflexion est simple et constant; ces deux portions sont toujours d'égale intensité. Cette loi vraiment remarquable a été découverte par Arago, et peut s'énoncer comme il suit: Si un rayon de lumière ordinaire tombant sur une surface réfléchissante est en partie réfléchi et en parti transmis, les portions réfléchies et transmises contiennent une égale quantité de lumière polarisée, et leurs plans de polarisation sont perpendiculaires entre eux. Dès lors, toutes les fois qu'un rayon de lumière rencontre la surface d'un milieu transparent, une partie de ce rayon est toujours partagée en deux autres d'égale intensité, polarisées, l'une dans le plan d'incidence, l'autre dans un plan perpendiculaire; la première de ces portions est réfléchie, tandis que la seconde est réfractée.

Si le rayon transmis est reçu par une seconde lame parallèle à la première, la portion de lumière polarisée qu'il contient subit un second fractionnement; il en sera de même à chaque nouvelle lame, et par conséquent si le nombre des lames est assez grand, la lumière transmise sera complétement polarisée. Un rayon est donc polarisé par une série de transmissions, comme il l'était par une série de réflexions successives; il y a cependant une différence notable entre l'action de ces deux causes, c'est que le plan de polarisation qui, pour le rayon successivement réfléchi, coïncidait avec le plan d'incidence, est, pour le rayon transmis, normal à ce même plan: ce

fait a été découvert par Malus. M. Brewster, en étudiant avec détail les lois de ces phénomènes, a reconnu qu'un rayon transmis à travers un certain nombre de plaques, toujours dans le même plan incidence, était complétement polarisé, lorsque la somme des tangentes des angles d'incidence était égale à une certaine constante : on en conclut que si toutes les plaques sont parallèles, et par conséquent tous les angles d'incidence égaux, la tangente de l'angle de polarisation complète sera en raison inverse du nombre des plaques.

Il résulte encore des mêmes principes que lorsque le rayon qui rencontre une pile de glace sous l'angle de polarisation a traversé un certain nombre de plaques, son intensité n'éprouve plus de diminution dans les transmissions subséquentes : en effet, aussitôt que le rayon transmis est complétement polarisé, son plan de polarisation devient perpendiculaire au plan d'incidence, et dès lors aucune portion de ce rayon ne pouvant être réfléchie par les plaques suivantes, il traversera ces plaques sans rien perdre, quel que soit leur nombre. Il n'en est plus ainsi lorsque le rayon rencontre la plaque sous un autre angle que l'angle de polarisation ; et par suite l'intensité de la lumière transmise à travers une plaque épaisse, est la plus grande possible, lorsque l'angle d'incidence est égal à l'angle de polarisation.

84. Il existe des cristaux qui, semblables à une pile de plaques transparentes, ont la faculté de polariser la lumière qu'elles transmettent. Ainsi, le rayon de lumière commune qui traverse une plaque de tourmaline sort polarisé dans un plan perpendiculaire à l'axe du cristal. Cette propriété dépend, en partie du moins, du pouvoir absorbant du cristal doublement réfringent, en ce sens que l'absorption du rayon polarisé varie avec la position, par rapport au cristal, de son plan de polarisation. Une tourmaline, par exemple, absorbe le rayon dont le plan de polarisation est parallèle à l'axe, plus rapidement que le rayon dont le plan de polarisation serait perpendiculaire à ce même axe. Tout rayon de lumière commune qui traverse ce même cristal est partagé en deux autres rayons polarisés, le premier dans un plan passant par l'axe, le second dans un plan perpendiculaire à l'axe ; le premier de ces rayons est plus vite absorbé, de sorte que si la plaque est suffisamment épaisse, le dernier rayon apparaitra seul dans la lumière transmise.

La tourmaline est d'une extrême utilité dans toutes les expériences de polarisation ayant pour objet la lumière ; elle ne donne pas seulement le moyen de mettre la polarisation en évidence, elle fournit de plus de la lumière polarisée. Malheureusement, le rayon émergent n'est jamais complétement polarisé, et son intensité est considérablement affaiblie par l'absorption. La polarisation déterminée par la double réfraction est la plus complète de toutes, et de plus l'intensité du rayon polarisé ainsi obtenu est aussi la plus grande possible ; elle est presque la moitié de l'intensité du rayon primitif. L'intensité de la lumière réfléchie par une lame de verre sous l'angle de polarisation est à peine le douzième de la lumière incidente.

85. Tel est l'ensemble des faits relatifs au phénomène de la polarisation par réflexion ou par réfraction simple. Ne semble-t-il pas, d'après ce que nous venons de dire, qu'un rayon de lumière ordinaire peut en quelque manière être comparé à une baguette ronde, ou à un cylindre incliné d'une manière invariable dans un plan tangent à une surface quelconque, et qui peut tourner autour de son axe sans changer de relation à l'égard de ce plan ? Le rayon polarisé, au contraire, ne pourrait-il pas être comparé à une règle plate dont les relations avec le plan changent continuellement si on le fait tourner ? La transmission ou la non-transmission d'un semblable rayon aplati, peut se comparer à la facilité avec laquelle une règle présentée de champ passe entre les barreaux d'une grille, et à l'impossibilité de la faire passer si on la présente dans la direction transversale. Le rayon polarisé ne peut pas être transmis par une tourmaline qui lui serait perpendiculaire si l'axe de la tourmaline se trouve dans le plan de polarisation, ce qui s'explique très bien en poursuivant la comparaison déjà employée, si l'on admet que la règle aplatie, image du rayon polarisé, est perpendiculaire au plan de polarisation : alors, en effet, cette règle rencontrerait transversalement les fibres de la tourmaline placée comme nous l'avons dit, ce qui indiquerait suffisamment que le rayon ne pourra pas la traverser.

86. Arrivons maintenant à l'explication comparée des faits dans les deux systèmes. C'est vraiment quelque chose d'étrange que de voir la théorie des ondulations régner en souveraine et sans rivale dans

cette branche même de l'optique que Newton lui opposait comme la plus formidable des objections. « Ne sont-elles pas évidemment erronées, s'écriait-il, ces vaines hypothèses dans lesquelles on admet que la lumière est le résultat de pressions ou vibrations propagées dans un milieu fluide? car des pressions ou vibrations excitées par le corps lumineux dans un milieu homogène seraient évidemment semblables à elles-mêmes sur toutes les faces ou côtés, tandis qu'il est certain qu'un rayon lumineux jouit de propriétés différentes, suivant le côté par lequel on l'attaque. » En énonçant cette objection, Newton avait en vue sans doute ce mode de mouvement ondulatoire dont il avait scruté les lois avec tant de sagacité.

Lorsque le son se propage dans l'air, dans l'eau ou dans un autre milieu homogène, les vibrations des particules d'air ou d'eau s'exécutent dans la direction même suivant laquelle l'onde se propage; et si les vibrations éthérées qui constituent la lumière étaient de même nature, l'objection de Newton semblerait insurmontable. En effet, si les particules de l'éther vibrent dans la direction même du rayon, comment concevoir qu'un semblable rayon aura des relations différentes avec les diverses parties du milieu ambiant? tout alors ne devrait-il pas être réellement identique au-dessus ou au-dessous, à la droite ou à la gauche du rayon ?

Mais en sera-t-il encore de même si les vibrations des molécules d'éther sont transversales ou perpendiculaires à la direction du rayon? N'est-il pas évident qu'il n'y a plus dans ce cas de symétrie, que le rayon supposé, par exemple, horizontal est, par rapport aux molécules situées au-dessus et au-dessous de son plan, dans des conditions tout-à-fait différentes de celles sous lesquelles il se présente aux molécules situées à droite ou à gauche? il est comme indifférent aux premières, tandis qu'il tend à pénétrer les secondes, à les mettre en mouvement. Dans le système des vibrations ou ondulations, la polarité d'un rayon est donc un fait nécessaire, naturel, et qu'on touche du doigt, tandis que cette même polarité est une assertion gratuite, un mystère dans l'hypothèse de l'émission : aussi ne nous arrêtons-nous pas aux explications si incomplètes, si insuffisantes qu'on a prétendu donner des phénomènes de la polarisation dans le système de Newton.

Ce seul principe, que les vibrations des molécules de l'éther

s'exécutent dans le plan de l'onde perpendiculairement au rayon, suffit à rendre compte des faits les plus compliqués en apparence.

87. Si le déplacement d'une molécule est très petit comparativement à la distance qui sépare les molécules de l'éther, la force résultant de l'attraction exercée par les particules voisines, et qui tend à ramener la première molécule à sa position d'équilibre, sera proportionnelle au déplacement; et dès lors, en vertu des lois bien connues de la dynamique, la trajectoire décrite par la molécule sera une ellipse dont le centre sera sa position d'équilibre. Les vibrations des molécules d'éther sont donc en général elliptiques, et la nature de la lumière dépend de la direction et de la grandeur relative de ces axes. Si ces axes, situés, comme nous l'avons dit, dans le plan même de l'onde, ont constamment la même direction, la lumière sera polarisée; elle sera au contraire de la lumière commune si les axes changent perpétuellement de direction.

La grandeur relative des axes de l'ellipse déterminera le genre de polarisation qui sera circulaire si, les axes étant égaux, la trajectoire devient un cercle; rectiligne si, le plus petit axe s'évanouissant, la trajectoire est une ligne droite; elliptique enfin dans tous les autres cas. Les caractères de ce dernier mode de polarisation varient indéfiniment en s'éloignant ou se rapprochant des limites extrêmes qui sont la polarisation circulaire, et la polarisation rectiligne qu'on nomme aussi polarisation plane, parce que les vibrations des molécules sont alors concentrées dans un plan qui est comme le front de l'onde.

88. L'existence exclusive dans la lumière de vibrations transversales est une conséquence nécessaire des lois observées de l'interférence des rayons polarisés, lois sur lesquelles nous reviendrons plus tard. Fresnel et M. Arago ont prouvé expérimentalement que deux rayons polarisés dans des plans opposés, c'est-à-dire dans des plans qui se coupent à angles droits, forment un rayon unique dont l'intensité est constante, quelles que soient les phases de vibrations dans lesquelles ces rayons se rencontrent : or, la théorie nous apprend que l'intensité de la lumière résultant de l'union de deux rayons polarisés dans des plans opposés n'est constante et indépendante des phases qu'autant que les vibrations perpendiculaires au plan de l'onde, ou dirigées dans le sens du rayon, n'existent pas. Dans la lumière

commune donc, comme dans la lumière polarisée, il n'y a de vibrations que sur la surface de l'onde ; et nous sommes forcés d'admettre que la lumière en général consiste dans la succession rapide de systèmes d'ondes dans lesquelles les vibrations s'exécutent suivant toutes les directions possibles dans le plan tangent à cette surface. Cela posé, le phénomène de la polarisation suppose ou comprend deux choses : 1° la réduction de toutes ces vibrations à deux ensembles de vibrations dans deux directions rectangulaires ; 2° la séparation ou l'isolement des deux systèmes d'ondes auxquelles les deux ensembles de vibrations donneraient naissance. Si l'isolement est complet, si le rayon ne se compose plus que de vibrations exécutées dans une seule direction, la polarisation est complète ; elle est incomplète lorsque l'une des ondes, sans avoir été entièrement éliminée, a seulement perdu de son intensité.

89. Supposons maintenant qu'un rayon de lumière commune rencontre une surface réfléchissante, on pourra supposer qu'il est décomposé en deux autres d'intensités égales, et qui soient polarisés l'un dans le plan d'incidence, l'autre perpendiculairement à ce plan. Chacun de ces rayons donnera naissance à un rayon réfléchi et à un rayon réfracté, de telle sorte que le rayon total réfléchi et le rayon total réfracté se composeront l'un et l'autre de deux portions polarisées, l'une dans le plan d'incidence, l'autre perpendiculairement à ce plan. Si ces deux portions avaient, comme dans la lumière incidente, la même intensité, le rayon réfléchi et le rayon réfracté seraient eux-mêmes de la lumière commune ou non polarisée, mais il n'en est pas ainsi en général.

Considérons d'abord le rayon réfléchi : en prenant pour unité l'intensité du rayon incident, et appelant i, $r = i$, ρ, les angles d'incidence, de réflexion et de réfraction, on trouvera que les intensités des rayons polarisés dans le dlan d'incidence et perpendiculairement à ce plan sont respectivement (1) :

$$\frac{1}{2}\frac{\sin^2(r-\rho)}{\sin^2(r+\rho)},\quad \frac{1}{2}\frac{\tang^2(r-\rho)}{\tang^2(r+\rho)}.$$

(1) J'ai dit avec détail dans la première partie de ce travail comment M. Cauchy avait pu établir rigoureusement les formules qui donnent les intensités des rayons réfléchis et réfractés ; je suis toujours convaincu que la

La somme de ces deux intensités partielles donnera l'intensité totale du rayon réfléchi : or, ces deux intensités sont inégales, donc les deux portions de polarisation opposée ou à angle droit dont se compose la lumière réfléchie ont des intensités différentes, et par conséquent la lumière réfléchie n'est pas en général de la lumière commune ou non polarisée, elle contient toujours un excès de lumière polarisée dans le plan d'incidence, car la première des expressions qui précèdent est toujours plus grande que la seconde. Ce résultat est entièrement conforme à l'expérience ; on l'exprime sous une autre forme en disant que la lumière réfléchie est partiellement polarisée dans le plan d'incidence.

Au contraire, les portions du rayon réfracté polarisées dans le

marche suivie par l'illustre géomètre est seule logique, seule vraiment démonstrative ; mais mon opinion ne sera peut-être pas acceptée par tout le monde, et l'on me saurait mauvais gré de ne pas exposer la méthode suivie par MM. Mac Cullagh et Newmann. La voici en peu de mots : Ils admettent comme axiomes ou comme hypothèses, sans les démontrer, les principes suivants : 1° la résultante des vibrations est la même dans les deux milieux : si la réfraction est simple, la vibration réfractée est la résultante des vibrations incidentes et réfléchies. En cela, suivant M. Mac Cullagh, consiste le principe de l'équivalence des vibrations. 2° Le produit de la masse de l'éther mis en mouvement par le carré de l'amplitude de la vibration, reste le même avant et après la réflexion et la réfraction : c'est l'application de la loi bien connue de la conservation des forces vives. 3° La densité de l'éther est dans tous les corps la même que dans le vide. 4° Dans la lumière polarisée, les vibrations sont parallèles au plan de polarisation.

Cela posé, si un rayon polarisé dans le plan d'incidence vient à se réfléchir et à se réfracter, puisque les vibrations sont dans ce cas parallèles au plan d'incidence, et perpendiculaires aux rayons, elles feront entre elles les mêmes angles $2r$, $r-\rho$, $r+\rho$ que les rayons, et par conséquent si l'on désigne par Ar, $A\rho$, les amplitudes des vibrations réfléchies et réfractées, l'amplitude de la vibration incidente étant prise pour unité, on aura immédiatement, en vertu du principe des vibrations équivalentes,

$$Ar = \frac{\sin(r-\rho)}{\sin(r+\rho)}, \quad A\rho = \frac{\sin 2r}{\sin(r+\rho)}.$$

Si le rayon était polarisé perpendiculairement au plan d'incidence, les vibrations des rayons incidents, réfléchis, réfractés, seraient toutes parallèles ; et puisque la vibration réfractée est la résultante des vibrations incidentes et réfléchie, on aurait $A\rho = 1 - Ar$. De plus, le principe des forces vives en appelant m et m' les masses d'éther mises en mouvement dans les deux mi-

plan d'incidence et perpendiculairement à ce plan sont respectivement en vertu du principe de la conservation des formes vives

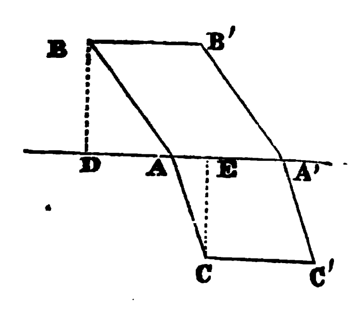
$$\frac{1}{2}\left(1-\frac{\sin^2(r-\rho)}{\sin^2(r+\rho)}\right),\ \frac{1}{2}\left(1-\frac{\operatorname{tang}^2(r-\rho)}{\operatorname{tang}^2(r+\rho)}\right).$$

Comme la seconde de ces quantités est plus grande que la première, le rayon réfracté contient toujours un excès de lumière polarisée perpendiculairement au plan d'incidence. La quantité de lumière polarisée mesurée par la différence des deux intensités partielles, est évidemment égale à la quantité de lumière polarisée en sens opposé que contient le rayon réfléchi : la loi que M. Arago déduisit de l'expérience, est donc une conséquence nécessaire de la théorie.

La lumière réfléchie sera complétement polarisée quand une des

lieux, donne $m(1-Ar^2)=m'A\rho^2$. De ces deux équations réunie on tire :

$$Ar=-\frac{m-m'}{m+m'},\ A\rho=\frac{2m}{m+m'};$$



Ces relations remarquables sont précisément celles qui lient les vitesses, après le choc, de deux sphères élastiques. Reste à évaluer les masses m, m'; or, si AB, AC, représentent les vitesses et les directions des rayons incidents et réfractés, les masses d'éther en mouvement dans les deux milieux seront proportionnelles aux parallélogrammes AB' AC', ou, puisqu'ils ont même base, à leurs hauteurs BD, CE, on a donc :

$$\frac{m}{m'}=\frac{BD}{CE}=\frac{AB\cos r}{AC\cos\rho};$$

et parce que les vitesses AB, AC, sont proportionnelles aux sinus d'incidence et de réfraction :

$$\frac{m}{m'}=\frac{\sin r\cos r}{\sin\rho\cos\rho}=\frac{\sin 2r}{\sin 2\rho},$$

on trouvera en substituant :

$$Ar=-\frac{\operatorname{tang}(r-\rho)}{\operatorname{tang}(r+\rho)},\ A\rho=\frac{\sin 2r}{\sin(r+\rho)\cos(r-\rho)}.$$

L'intensité de la lumière étant mesurée généralement par la force vive est égale au produit de la masse en mouvement par le carré de l'amplitude de la

parties dont elle se compose s'évanouira, puisqu'alors la totalité de la lumière réfléchie sera polarisée dans un seul plan. Il est aisé de voir que la première portion, polarisée dans le plan d'incidence, ne peut pas s'évanouir : la seconde, au contraire, disparait quand le dénominateur de la seconde fraction devient infini, ou quand on a

vibration, les intensités Ii, Ir, $I\rho$ des rayons incident, réfléchi et réfracté, seront donc :

$$Ii = m,\ Ir = m\,A_r^2,\ I\rho = m'\,A\rho^2 = m\,(1 - A_r^2),$$

ou en prenant pour unité d'intensité, l'intensité de la lumière incidente :

$$Ir = A_r^2,\ I\rho = 1 - A_r^2,$$

appliquant tour à tour ces formules aux rayons polarisés parallèlement ou perpendiculairement au plan d'incidence.

On trouvera pour le rayon polarisé dans le plan d'incidence :

$$Ir = \frac{1}{2}\frac{\sin^2(r-\rho)}{\sin^2(r+\rho)},\ I\rho = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{\sin^2(r-\rho)}{\sin^2(r+\rho)}\right),$$

pour le rayon polarisé perpendiculairement au plan d'incidence :

$$Ir = \frac{1}{2}\frac{\text{tang}^2(r-\rho)}{\text{tang}^2(r+\rho)},\ I\rho = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{\text{tang}^2(r-\rho)}{\text{tang}^2(r+\rho)}\right),$$

Terminons par une remarque qui n'est pas sans quelque intérêt. En ayant égard au signe des amplitudes des vibrations réfléchies, on a :

$$Ar = \frac{\sin(r-\rho)}{\sin(r+\rho)},\ \text{ou}\ Ar = -\frac{\text{tang}(r-\rho)}{\text{tang}(r+\rho)}$$

suivant que le rayon incident est polarisé parallèlement ou perpendiculairement au plan d'incidence. Comme l'angle de réflexion r est égal à l'angle d'incidence i, on aura aussi :

$$Ar = \frac{\sin(i-\rho)}{\sin(i+\rho)},\ \text{ou}\ Ar = -\frac{\text{tang}(i-\rho)}{\text{tang}(i+\rho)}.$$

La première de ces expressions est toujours positive tant que l'angle d'incidence est compris entre 0 ou 90°; la seconde, négative d'abord, s'évanouit comme l'exige la loi de Brewster, quand $i + \rho = 90°$, ou quand l'angle d'incidence est égal à l'angle de polarisation : elle devient ensuite positive. M. Arago a prouvé qu'à ces alternatives de signes répondaient dans la nature des phénomènes réels. M. Lloyd a démontré de son côté par des expériences très simples et très élégantes, que dans le cas ou $i = 90°$, c'est-à-dire dans le cas extrême ou le rayon rase la surface, les deux formules étaient parfaitement exactes, quant au signe et quant à la valeur absolue de l'amplitude. Il ne semble pas qu'on les ait vérifiées dans le second cas extrême de $i = 0$, ou quand le rayon tombe perpendiculairement sur la surface réfléchissante.

$$r + \rho = 90°,$$

dans ce cas seulement la lumière réfléchie est complétement polarisée dans le plan d'incidence. Mais de l'équation :

$$r + \rho = 90°,$$

on tire :

$$\cos r = \sin \rho = \frac{\sin r}{e}, \text{ ou } \operatorname{tang} r = e,$$

donc la tangente de l'angle de polarisation est égale à l'indice de réfraction ; la belle loi que M. Brewster avait conclue de ses observations, est un simple corollaire de la théorie de Fresnel.

90. Lorsqu'un rayon polarisé rencontre sous différents angles une surface réfléchissante, le rayon réfléchi est aussi polarisé, mais son plan de polarisation a changé. Le déplacement de ce plan l'a rapproché du plan de réflexion, et la valeur de ce rapprochement dépend de l'angle d'incidence. Si cet angle est nul, ou si le rayon est normal à la surface réfléchissante, le plan de polarisation ne change pas ; à

Dans ce cas, les angles i et ρ étant infiniment petits, on a sensiblement

$\frac{i}{\rho} = \frac{\sin i}{\sin \rho} = e$, e étant toujours l'indice de réfraction,

$\sin(i - \rho) = \operatorname{tang}(i - \rho) = \rho(e - 1)$, $\sin(i + \rho) = \operatorname{tang}(i + \rho) = \rho(e + 1)$, et par suite :

$$A_r = \frac{e-1}{e+1} \text{ ou } A_r = -\frac{e-1}{e+1}.$$

Les amplitudes sont donc égales et de signe contraire, c'est-à-dire que les deux rayons réfléchis ont même intensité ; mais tandis que la phase correspondante au rayon polarisé dans le plan d'incidence, et dont les vibrations sont perpendiculaires à ce plan, dans l'hypothèse au moins de Fresnel et de M. Cauchy, n'éprouve aucun changement, la phase correspondante aux vibrations situées dans le plan d'incidence subit un retard ou une avance d'une demi-ondulation. M. Earnchaw de Cambridge concluait de cette remarque qu'un rayon polarisé circulairement à droite, devait, par la réflexion sous un angle très peu différent de 90°, se transformer en un rayon polarisé circulairement à gauche, ou devait être comme retourné. Le physicien anglais ajoutait qu'il était à désirer qu'un expérimentateur habile vérifiât cette conséquence si neuve et si simple de la théorie des ondulations. La vérification a été faite, M. Powell annonce que cette fois comme toujours les prévisions de la théorie sont devenues la réalité de l'expérience.

mesure que l'angle d'incidence augmente, le mouvement du plan de polarisation continue lui-même jusqu'à ce que l'angle d'incidence atteigne l'angle de polarisation ; le déplacement produit est alors le plus grand possible, et le plan de polarisation vient coïncider avec le plan de réflexion. Si l'angle d'incidence augmente encore, le déplacement du plan de polarisation diminue jusqu'à ce qu'il redevienne nul une seconde fois lorsque l'angle d'incidence sera égal à 90°.

Ces phénomènes et leurs lois découlent très naturellement de la théorie que nous avons déjà développée. Pour le montrer, concevons que la vibration du rayon incident soit décomposée en deux autres, l'une dans le plan d'incidence, l'autre perpendiculaire au plan d'incidence; appelons A l'amplitude de la vibration et a l'angle qu'elle fait avec le plan d'incidence. Les composantes seront A $\cos a$, A $\sin a$, et deviendront dans l'acte de la réflexion

$$A \cos a \frac{\sin (r - \rho)}{\sin (r + \rho)}, \quad A \sin a \frac{\tang (r - \rho)}{\tang (r + \rho)}.$$

Il en résultera une vibration qui fera avec le plan d'incidence un angle a_1, dont la tangente égale au rapport des vibrations composantes sera

$$\tang a_1 = \tang a \frac{\cos (r + \rho)}{\cos (r - \rho)}.$$

Fresnel d'abord, et après lui MM. Brewster et Arago ont vérifié pleinement, par l'observation, la vérité de cette formule. On en conclut, 1° que si $r = o$ ou $r = 90°$, $a_1 = a$, c'est-à-dire que la réflexion ne fait pas varier le plan de polarisation lorsque le rayon rencontre la surface soit sous une incidence perpendiculaire, soit sous un très petit angle; 2° que si le rayon incident est polarisé dans le plan d'incidence, la réflexion, quel que soit l'angle d'incidence, ne déplace pas le plan de polarisation; 3° réciproquement que quel que soit le plan de polarisation du rayon incident, la réflexion le fera concorder avec le plan d'incidence, si le rayon rencontre la surface sous l'angle de polarisation.

Si un rayon subit un certain nombre n de réflexions entre deux plaques parallèles, l'angle a_n que le plan de polarisation fera, après ces n réflexions, avec le plan de réflexion, est donné par la formule

$$\tang a_n = \frac{\cos^n (r+\rho)}{\cos^n (r-\rho)}$$

et décroîtra par conséquent indéfiniment à mesure que le nombre des réflexions augmentera, puisque sa tangente décroît en progression géométrique. Le décroissement est d'autant plus rapide, que l'angle d'incidence approche plus de l'angle de polarisation pour lequel on a :

$$i+\rho = r+\rho = 90°, \cos (r+\rho) = o.$$

91. Le plan de polarisation est déplacé par la réfraction comme il l'est par la réflexion, mais en sens contraire; il s'éloigne du plan d'incidence au lieu de s'en rapprocher. Le déplacement croît avec l'angle d'incidence : il est nul quand le rayon est normal à la surface réfringente, et le plus grand possible quand le rayon rencontre cette même surface très obliquement. La loi du déplacement est exprimée par la formule très simple

$$\cot a_1 = \cot a \cos (r-\rho),$$

dans laquelle a et a_1 représentent les angles que le plan de polarisation forme avec le plan d'incidence avant et après la réfraction. Cette loi, découverte expérimentalement par M. Brewster, se déduit très simplement de la théorie.

92. Concevons maintenant un rayon de lumière commune comme formé de la réunion de deux rayons polarisés, dont les plans de polarisation soient l'un à 45° à droite, l'autre à 45° à gauche du plan d'incidence. La réfraction aura pour effet de faire croître les angles que ces plans de polarisation faisaient avec le plan d'incidence, et par suite l'angle qu'ils formaient entre eux. Dans une seconde, une troisième réfraction... cet angle continuera de croître jusqu'à ce qu'il soit sensiblement égal à 180°. Alors, évidemment, le rayon sera complétement polarisé dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence.

En voyant les formules qui donnent l'intensité de la lumière réfléchie devenir imaginaires, lorsque l'angle d'incidence surpasse l'angle de réflexion totale, dans le cas où la lumière passe d'un milieu plus dense dans un milieu moins dense, Fresnel avait conclu que les périodes de vibrations des rayons incident et réfléchi ne

coïncidaient plus, ou en d'autres termes que le rayon, au moment de la réflexion, subissait un changement de phase. L'ingénieux physicien avait même donné l'expression générale de ce changement de phase, qui varie avec l'incidence et qui est différent suivant que le rayon est polarisé dans le plan d'incidence, ou perpendiculairement à ce plan.

Lorsqu'un rayon est polarisé dans un plan quelconque, on peut décomposer ses vibrations en deux autres, l'une parallèle, l'autre perpendiculaire au plan d'incidence. Les phases de ces vibrations composantes seront inégalement altérées par la réflexion. Dès lors, la vibration du rayon réfléchi résultant de deux vibrations rectangulaires de phases différentes sera nécessairement une ellipse, de sorte que le rayon réfléchi sera polarisé elliptiquement. Si l'azimuth du plan de polarisation du rayon incident est de 45°, les amplitudes des vibrations composantes seront égales, et si de plus la différence de phase est le quart d'une ondulation, l'ellipse deviendra un cercle, la lumière sera polarisée circulairement (1).

Passant aux nombres, Fresnel avait trouvé qu'en prenant pour milieu réfringent la glace de Saint-Gobain, pour angle d'incidence

(1) Un calcul facile mettra ce résultat en évidence. Appelons a, b, les amplitudes des deux vibrations composantes; α, β, leurs phases; x, y, les déplacements de la molécule dans le sens des axes rectangulaires. En vertu des principes que nous avons établis, on aura :

$$x = a\cos(kr - st + \alpha), \quad y = b\cos(kr - st + \beta),$$

d'où l'on tire :

$$\alpha - \beta = \text{arc}\cos\frac{x}{a} - \text{arc}\cos\frac{y}{b};$$

prenant les cosinus des deux membres, on trouve :

$$\cos(\alpha - \beta) = \frac{xy}{ab} + \frac{1}{ab}\sqrt{b^2 - y^2}\sqrt{a^2 - x^2}$$

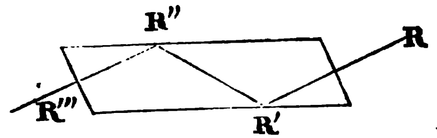
et en chassant le radical,

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 2\frac{xy}{ab}\cos(\alpha - \beta) = \sin^2(\alpha - \beta),$$

c'est évidemment l'équation de l'ellipse décrite par la molécule.

Si $a = b$, $\alpha - \beta = 90°$, l'équation devient $x^2 + y^2 = a^2$, la trajectoire est un cercle.

54° 37′, la différence de phase des deux rayons composants serait égale au huitième d'une ondulation. Pour vérifier ce résultat, il prit un parallélipipède de cette substance, dans lequel les faces d'incidence et d'émergence faisaient précisément avec les autres faces des angles égaux à 54° 37′. Le rayon R R′ R″ R‴, tombant perpendiculairement sur une des faces et réfléchi par deux autres en R′ et R″, devra sortir perpendiculairement à la dernière face; et la différence de phase entre les portions deux fois réfléchies du rayon, devra être d'un quart d'ondulation, ou de 90°. Dès lors, si le rayon incident est polarisé à 45° du plan de réflexion, le rayon émergent sera polarisé circulairement, c'est ce qu'a prouvé l'expérience en confirmant pleinement la théorie. Le parallélipipède dont nous venons de parler est connu sous le nom de rhombe de Fresnel; son emploi est indispensable dans toutes les expériences relatives à la polarisation elliptique et circulaire.



93. Si le rayon émergent subissait deux nouvelles réflexions totales dans le même plan, et sous le même angle, en passant par un second rhombe placé parallèlement au premier, il devrait sortir rectilignement polarisé; son plan de polarisation devrait être incliné de 45° de l'autre côté du plan de réflexion, puisque la différence de phases serait de 180°, et l'on sait que deux vibrations égales dont les phases diffèrent de 180°, ont pour résultante une seule vibration rectiligne dont la direction partage en deux parties égales l'angle supplément de celui que font entre elles les vibrations composantes. Cette propriété nous fournit le moyen de distinguer la polarisation circulaire de la polarisation rectiligne. Le rayon polarisé circulairement devient polarisé rectilignement après deux réflexions totales sous l'angle de 54° 1/2. On le distingue encore d'un rayon polarisé rectilignement par cette circonstance, qu'il est partagé en deux rayons d'égale intensité par un cristal doublement réfringent, quelle que soit d'ailleurs la position de la section principale.

Nous ne disons rien ici des lois de la polarisation elliptique produite par la réflexion sur une surface métallique, nous en avons longuement parlé dans l'exposé de la théorie de M. Cauchy, qui seul

a résolu les difficultés insurmontables qui rendaient ces lois inaccessibles à la théorie.

94. Comme les vibrations qui donnent naissance aux deux ondes dont se compose la double réfraction sont parallèles à deux lignes fixes, au plus grand et au plus petit diamètre de la section correspondante de la surface d'élasticité, il en résulte que les deux rayons ordinaire et extraordinaire doivent être polarisés dans deux plans rectangulaires passant par la direction du rayon et les deux lignes fixes. Il en résulte encore que le plan de polarisation d'un des rayons divise en parties égales l'angle dièdre formé par les deux plans qui renferment la normale à l'onde et les normales aux deux sections circulaires de la surface d'élasticité, tandis que le second plan de polarisation est perpendiculaire au premier. Or, toutes ces conséquences sont réalisées dans la nature. Le phénomène de la polarisation s'est montré d'abord dans les rayons obtenus par la double réfraction, et M. Biot avait indiqué comme résultat de ses expériences, la proposition suivante qui diffère très peu de la loi que nous venons d'énoncer. « Le plan de polarisation de l'un des rayons divise en parties égales l'angle dièdre formé par les plans qui renferment le rayon et les deux axes optiques; le plan de polarisation du second rayon est perpendiculaire au premier, ou divise en parties égales l'angle dièdre supplémentaire. »

95. La théorie des ondulations rend donc compte de la polarisation qui naît de la double réfraction; elle n'a pas été moins heureuse quand il s'est agi de la réfraction conique. En examinant l'état de polarisation des rayons qui composent le cône émergent, M. Lloyd avait été surpris de voir que chacun de ces rayons était polarisé dans un plan différent : un examen plus attentif lui montra que tous les plans de polarisation étaient liés entre eux par une loi remarquable, et que l'angle compris entre les plans de polarisation de deux rayons du cône, est la moitié de l'angle compris entre les deux plans qui renferment les rayons et l'axe. M. Lloyd s'assura que la théorie de Fresnel conduisait à cette même loi, qui se reproduisit comme cela devait être dans le cas de la réfraction conique intérieure.

N'est-il pas évident par tout ce qui précède que le système des ondulations explique jusqu'aux plus petites particularités des phé-

nomènes de la polarisation, et qu'ici encore il est l'expression naturelle et rigoureuse des faits. Les explications qu'on a essayées de ces mêmes phénomènes dans le système de l'émission sont si arbitraires, si incomplètes, que nous nous sommes crus dispensés de les rappeler; elles n'éclaircissent rien, et surtout ne font rien prévoir.

Dispersion de la lumière et couleurs. — 96. Dans tout ce qui va suivre, nous ferons marcher de front, pour plus de simplicité, et la théorie mathématique de M. Cauchy, et la comparaison physique des deux systèmes de l'émission et des ondulations.

Jusqu'ici nous avons considéré la propagation du mouvement vibratoire et les modifications qu'il subit, sans avoir égard à sa nature interne, et aux qualités spécifiques qu'il peut revêtir. Il est cependant évident *à priori* qu'une première sorte de vibration peut différer d'une autre quelconque par deux particularités essentielles, l'amplitude et la durée. Dans les pulsations de l'air, l'amplitude de la vibration détermine l'intensité du son; sa durée ou le nombre de vibrations dans un temps déterminé constitue le ton du son, sa gravité ou son acuité. Il paraissait naturel d'admettre par analogie que l'amplitude de la vibration de la molécule d'éther détermine l'intensité de la lumière, et que sa durée constitue la couleur; c'est ce qu'ont communément admis jusqu'ici les partisans du système des ondulations. Dans son beau mémoire sur le procédé de la vision, M. Moser rejette l'idée universellement reçue; suivant lui, la couleur devrait être plutôt comparée au timbre qu'au ton du son, et le nerf optique, au lieu d'apprécier les innombrables vibrations qui donnent naissance à la lumière, transmettrait seulement à l'âme la sensation d'une modification physique ou chimique subie par la rétine. Quoi qu'il en soit, il est du moins certain que deux rayons lumineux peuvent différer l'un de l'autre par l'intensité et la couleur.

97. Lorsqu'un rayon de lumière blanche tombe perpendiculairement sur la surface supposée plane d'un milieu isophane, il pénètre dans l'intérieur de ce milieu, sans changer de direction, et sans que les couleurs se séparent. Mais si le rayon incident devient oblique à la surface, l'angle de réfraction variera en même temps que la nature de la couleur, et par suite les rayons réfractés de diverses couleurs se sépareront les uns des autres, en demeurant tout compris dans le même plan. C'est en cela

que consiste le phénomène de la dispersion qu'on a appelée plane, en raison de la circonstance que nous venons de rappeler; d'ailleurs, si le rayon incident est doué de la polarisation rectiligne, ou de la polarisation elliptique qui comprend elle-même comme cas particulier la polarisation circulaire, les rayons réfractés offriront encore l'un ou l'autre genre de polarisation.

Si l'on admet que la couleur dépende du nombre des vibrations perçues par l'œil dans un temps donné; que de plus, comme l'indique la théorie, la réfrangibilité décroît avec la longueur de l'onde, et croît par conséquent avec le nombre des vibrations, il faudra nécessairement reconnaître que la couleur violette est produite par les vibrations les plus rapides, la couleur rouge par les vibrations les moins rapides. A l'aide d'expériences que nous rappellerons plus tard, on a trouvé que les longueurs d'onde correspondantes à l'extrémité rouge et violet du spectre, étaient respectivement égales à 260 et 423 millionièmes de millimètre, ce qui s'accorde bien avec les réfrangibilités de ces deux rayons, et confirme l'opinion que nous exposions tout-à-l'heure relativement à la nature des couleurs. Il résulte encore de ce que nous venons de dire, que la sensibilité de l'œil est resserrée entre des limites plus étroites que celles de l'oreille, puisque le rapport des vibrations extrêmes est à peu près celui de 1,58 à 1, tandis que l'oreille perçoit également un son, et son octave, et sa double, sa triple octave, etc. Rien toutefois n'incline à croire que les nombres de vibrations lumineuses sont renfermées entre les limites que nous avons assignées : on a découvert dans le spectre des rayons obscurs dont la réfrangibilité est plus grande que celle des rayons violets, et M. Moser a rendu très probable l'existence de rayons invisibles plus réfrangibles encore.

98. L'analyse semblait indiquer que la vitesse de propagation d'une onde est indépendante de l'amplitude ou de la durée de ses vibrations, et que par conséquent elle était toujours la même dans un même milieu. Ainsi, tous les sons aigus ou graves, forts ou faibles, se propagent avec la même vitesse dans l'air ou dans un milieu quelconque, et l'on devait croire, ce semble, que si la lumière est produite par les ondulations de l'éther, elle devait se propager avec la même vitesse, quelles que fussent sa couleur et son intensité. Il n'en est pas cependant ainsi, puisqu'en se réfractant les rayons de diverses

couleurs se séparent. Pour expliquer ce phénomène, les modernes défenseurs du système de l'émission ont été forcés d'admettre que les molécules lumineuses sont hétérogènes, que les attractions exercées sur elles dépendent de la nature des corps et doivent être comparées aux affinités chimiques. L'immortel Young ne craignait pas de dire qu'on n'avait eu recours à ces vaines hypothèses que pour jeter un voile sur la triste impuissance où l'on était d'assigner à ces merveilleux effets une cause quelque peu raisonnable dans un système qui, au fond, est toujours plus ou moins en opposition avec les faits. Pour rendre raison de la dispersion dans le système des ondulations, il fallait forcément avouer que dans un même milieu la vitesse de propagation varie avec la longueur de l'onde. Or, nous venons de la rappeler, la théorie au contraire paraissait exiger que cette même vitesse dépendît uniquement de l'élasticité et de la densité, ou, ce qui revient au même, de la nature du milieu. Ces conclusions contradictoires créaient une difficulté vraiment redoutable qui resta longtemps insoluble. Il était réservé à M. Cauchy de trancher le nœud gordien, et de donner dans le système des ondulations l'explication naturelle et simple du phénomène de la dispersion. Pour arriver à conclure que la vitesse de propagation des ondes lumineuses est constante dans un même milieu, l'analyse devait supposer que la sphère d'action des molécules éthérées est infiniment petite comparée à la longueur de l'onde; or, cette restriction n'était qu'une fiction mathématique propre à conduire à une solution approchée du problème épineux de la propagation des ondes : dès qu'elle n'était pas fondée, on n'avait plus aucune raison d'affirmer que les ondes de différentes longueurs se propageaient avec la même vitesse; cette assertion n'était qu'une approximation donnée par une analyse incomplète. M. Coriolis eut le premier l'idée de rechercher si la considération des termes que l'on négligeait dans les développements ne fournirait pas le moyen d'expliquer la dispersion des couleurs. En suivant le conseil de son savant ami, M. Cauchy parvint à des formules à l'aide desquelles on peut non seulement assigner la cause du phénomène dont il s'agit, mais encore en découvrir les lois qui, malgré les nombreux et importants travaux des physiciens, étaient restées inconnues jusqu'à ce jour.

Pour une couleur donnée, la durée T des vibrations lumineuses,

ou, ce qui revient au même, le rapport $s = \frac{2\pi}{T}$, (π étant le rapport de la circonférence au diamètre) est constant; la réflexion et la réfraction ne font pas varier la couleur. Mais l'épaisseur l des ondes lumineuses, aussi appelée longueur d'ondulation, et par suite le rapport $k = \frac{2\pi}{l}$ se trouve lié à la vitesse de propagation $\omega = \frac{s}{k} = \frac{l}{T}$ par une équation de la forme : $\frac{s^2}{k^2} = \omega^2 = a_1 + a_2\, k^2 + a_3\, k^4 + \text{etc.}$, d'ou l'on tire $k^2 = b^1\, s^2 + b^2 s^4 + b^3\, s^5 + \text{etc.}$

En vertu de ces formules ω^2 et k^2 se développeront en séries convergentes ordonnées suivant les puissances ascendantes de k et de s. D'où il résulte que la vitesse de propagation dépend de la longueur de l'onde, et par la longueur de l'onde de la nature de la couleur.

Dans le vide et dans les milieux qui ne dispersent pas les couleurs, par exemple dans l'air atmosphérique, les coefficients a_2, a_3 ou s'évanouissent, ou alors $\omega^2 = a_1$, la vitesse de propagation devient constante et la même pour toutes les couleurs.

99. En désignant par E le carré e^2 de l'indice de réfraction d'une couleur quelconque, M. Cauchy démontre que E sera donné par la formule :

$$E = a + bs^2 + cs^4 + ds^6,$$

que l'on peut toujours réduire à quatre termes : a, b, c, d, sont des coefficients qui varient avec la nature du milieu réfringent. Quand, pour un milieu donné, on les aura déterminés une fois pour toutes par un nombre suffisant d'expériences, on pourra calculer pour ce milieu l'indice de réfraction d'une couleur quelconque et comparer le nombre ainsi obtenu avec le nombre donné par l'observation directe. M. Powel fit cette comparaison pour un très grand nombre de substances, en s'aidant des expériences de Frauenhofer : jamais les différences ne surpassèrent les limites des erreurs d'observation. Dans ses nouveaux exercices de mathématiques imprimés à Prague, M. Cauchy a refait par des méthodes très ingénieuses cette même comparaison ; la théorie s'est montrée partout en si parfait accord avec l'expérience ; cette fois encore, elle l'a

si heureusement suivie tour à tour et devancée, qu'on ne peut douter que l'illustre mathématicien n'ait découvert la loi véritable de la dispersion, loi restée inconnue jusqu'à lui, et que nous allons exposer avec quelques détails.

Observons d'abord que trouver la loi suivant laquelle un milieu isophane disperse les couleurs par la réfraction, c'est, en d'autres termes, trouver la loi suivant laquelle la vitesse de propagation d'un rayon lumineux varie dans ce milieu avec l'épaisseur des ondes, ou, ce qui revient au même, avec la longueur des ondulations. Cela posé, comme dans la formule qui donne ω^2, on peut toujours négliger les termes qui suivent le second, et la réduire à l'expression très simple

$$\omega^2 = a_1 + a_2 k^2$$

La loi de la dispersion peut s'énoncer très simplement comme il suit : le carré de la vitesse de propagation d'un rayon simple qui pénètre dans un milieu isophane se compose de deux termes, l'un constant, l'autre réciproquement proportionnel au carré de la longueur d'ondulation : ou, ce qui revient au même, pour les rayons de diverses couleurs, les différences entre les carrés des vitesses de propagation sont entre elles à très peu près comme les différences entre les carrés de nombres réciproquement proportionnels aux épaisseurs des ondes.

On peut être curieux de savoir avec quel degré d'approximation cette loi représente les expériences si délicates de Frauenhofer. C'est là un point qui mérite une attention sérieuse, et que nous allons examiner.

A l'aide d'observations faites avec beaucoup de soin sur la lumière réfractée par des prismes de diverses substances, Frauenhofer a déterminé les indices de réfraction correspondants à certains rayons colorés, ou plutôt à certaines raies que présente le spectre solaire. Par d'autres observations, il a déterminé les longueurs d'ondulation mesurées dans l'air et relatives à ces mêmes rayons. Or, en vertu de la loi ci-dessus énoncée, les différences entre les indices de réfraction devront être à très peu près proportionnelles aux différences entre les quotients qu'on obtient quand on divise l'unité par les carrés des longueurs d'ondulation. Voyons jusqu'à quel point cette condition se trouve remplie.

D'après les calculs de Frauenhofer, pour les sept rayons qu'il a choisis et désignés à l'aide des lettres :

B, C, D, E, F, G, H.

les longueurs d'ondulation, exprimées en cent-millionièmes de pouce, sont représentées sensiblement par les nombres :

(*a*) 2541, 2425, 2175, 1943, 1789, 1585, 1451.

Ces nombres, donnés par Frauenhofer dès les premières pages de son mémoire, se trouvent à la fin du mémoire remplacés par d'autres qui, à la vérité, diffèrent peu des premiers, mais qui en diffèrent cependant assez pour qu'on ne puisse répondre de l'exactitude de chaque nombre qu'à plusieurs millièmes près, ou même à un centième près ; car le dernier nombre 1451 se trouve remplacé à la fin du mémoire par le nombre 1464, et la différence 13 entre ces deux nombres se réduit sensiblement à la centième partie de chacun d'eux. D'ailleurs, si l'on ne peut répondre qu'à un centième près de l'exactitude des longueurs d'ondulation, on ne pourra répondre qu'à un cinquantième près de l'exactitude de leurs carrés et des nombres inverses de ces carrés. Or, ces nombres inverses, déduits de la série (*a*), seront sensiblement proportionnels aux suivants :

(*b*) 155, 170, 211, 265, 312, 398, 475,

qui, divisés par 50, donnent des quotients compris entre 3 et 10. On ne pourra donc répondre des termes de la suite (*b*) qu'à plusieurs unités près de l'ordre du dernier chiffre. Donc, pour décider si les expériences de Frauenhofer sont conformes à la loi de dispersion énoncée, il suffira d'examiner si les différences entre les termes de la suite (*b*), savoir :

(*c*) 15, 41, 54, 47, 86, 77,

se trouvent réprésentées, à quelques unités près, par des nombres sensiblement proportionnels aux différences entre les indices de réfraction relatifs aux différents rayons ; or, c'est effectivement ce qui a eu lieu. Ainsi, par exemple, Frauenhofer a trouvé que, pour une certaine espèce de flin-glass, les indices de réfraction relatifs aux rayons *B*, *C*, *D*, *E*, *F*, *G*, *H*, étaient respectivement :

1,627749 ; 1,629681 ; 1,635036 ; 1,642024 ; 1,648260 ; 1,660285 ; 1,671062 ;

et les différences entre ces nombres, savoir :

0,001932; 0,005355; 0,006988; 0,006236; 0,012025; 0,010777;
sont sensiblement proportionnels aux suivants :

(*d*) 14, 40, 52, 46, 89, 80.

D'ailleurs, ceux-ci diffèrent seulement de quelques unités des nombres déjà trouvés :

(*e*) 15, 41, 54, 47, 86, 77.

La plus grande différence :

$$80. - 77 = 3,$$

étant inférieure à la cinquantième et même à la centième partie du nombre :

$$475 = 398 + 77,$$

qui termine la série (*b*). Il y a plus : les diverses expériences de Frauenhofer, sur la lumière réfractée par l'eau, par une solution de potasse, par trois espèces de crown-glass et par quatre espèces de flint-glass, conduisent encore à des conclusions semblables, comme le prouvent les tableaux annexés au mémoire de M. Cauchy. Nous sommes donc en droit de conclure que, dans le cas où l'on admet la loi de la dispersion ci-dessus énoncée, les différences entre le résultat du calcul et les résultats de l'expérience tombent sensiblement dans les limites des erreurs d'observation.

100. M. Cauchy a rattaché très heureusement aux phénomènes de la dispersion des considérations ingénieuses sur la loi d'attraction, et la distance des molécules de l'éther. Comme cette partie de ses recherches est fort intéressante et fort peu connue, on nous saura gré de l'exposer avec quelque étendue. Pour chaque système de molécules ou pour chaque milieu, il existe en général, comme nous l'avons vu, trois sortes de mouvements simples ou par ondes planes : quand le système devient isotrope, ces trois mouvements se réduisent à deux, les vibrations des molécules étant transversales pour l'un, c'est-à-dire comprises dans le plan des ondes, et longitudinales pour l'autre, c'est à-dire per-

pendiculaires au plan des ondes. La vitesse de propagation des vibrations transversales s'évanouit lorsqu'on suppose l'action mutuelle de deux molécules réciproquement proportionnelle au cube de leur distance, ou plus généralement à une puissance de la distance intermédiaire entre la seconde et la quatrième puissance. Mais cette vitesse cesse de s'évanouir en offrant une valeur réelle, si l'action moléculaire est une force attractive en raison inverse du carré de la distance, ou une force répulsive en raison inverse du bicarré ou de la quatrième puissance de cette même distance; et alors la propagation de vibrations excitées en un point donné du système que l'on considère sera due principalement dans la première hypothèse aux molécules très éloignées, dans la seconde aux molécules très voisines de ce même point. Ajoutons que pour un mouvement par ondes planes, la vitesse de propagation des vibrations transversales sera dans la première hypothèse proportionnelle à l'épaisseur des ondes planes, et dans la seconde indépendante de cette épaisseur. Quant aux vibrations longitudinales, elles ne pourront, dans la première hypothèse, se propager sans s'affaiblir. Enfin, dans la seconde hypothèse, le rapport entre les vitesses de propagation des vibrations longitudinales et des vibrations transversales se présentera sous la forme infinie $1/o$, à moins qu'on ne prenne pour origine de l'intégrale qui donne la vitesse de propagation, non une valeur nulle de la distance, mais la distance entre deux molécules voisines. Observons encore que, supposer la vitesse de propagation des ondes planes indépendantes de leur épaisseur, c'est, dans la théorie de la lumière, supposer que la dispersion des couleurs devient insensible, comme elle paraît l'être quand les rayons lumineux traversent le vide. Donc la nullité de la dispersion dans le vide semble indiquer que dans le voisinage du contact, l'action mutuelle de deux molécules d'éther est répulsive et réciproquement proportionnelle au bicarré de la distance. Cette induction se trouve confirmée par les considérations suivantes. Lorsque l'action mutuelle de deux molécules est répulsive et réciproquement proportionnelle au bicarré de la distance, la vitesse de propagation des vibrations longitudinales est infinie ou du moins très considérable par rapport à la vitesse des vibrations transversales; or, lorsque la vitesse de propagation des vibrations longitudinales devient infinie, pour deux milieux sé-

parés l'un de l'autre par une surface plane, les vibrations peuvent être réfléchies sous un angle tel, que le rayon résultant de la réflexion soit complétement polarisé dans le plan d'incidence, et l'angle dont il s'agit a pour tangente le rapport du sinus d'incidence ou sinus de réfraction.

D'ailleurs, la polarisation des rayons lumineux sous ce même angle est précisément un fait constaté par l'expérience, et c'est en cela que consiste, comme l'on sait, la belle loi découverte par M. Brewster. Par conséquent, la théorie de M. Cauchy établit un rapport intime entre les deux propriétés que possèdent les rayons lumineux de se propager sans dispersion de couleur dans le vide, c'est-à-dire dans l'éther considéré isolément, et de se polariser complétement sous l'angle indiqué par M. Brewster, quand ils sont réfléchis par la surface de certains corps; en sorte que, le premier phénomène étant donné, l'autre s'en déduit immédiatement par le calcul.

Ce que nous venons de dire suppose que le rapprochement qui existe entre deux molécules consécutives du fluide éthéré est très considérable. Mais quelque grand que soit ce rapprochement, comme on ne peut supposer la distance de deux molécules voisines réduite absolument à zéro, il est naturel de penser que dans le vide la dispersion n'est pas non plus rigoureusement nulle, qu'elle est seulement assez petite pour avoir jusqu'à ce jour échappé aux observateurs. S'il y avait possibilité de la mesurer, ce serait, par exemple, à l'aide d'observations faites sur les étoiles périodiques, particulièrement sur celles qui paraissent et disparaissent, et sur les étoiles temporaires.

101. En effet, si l'on attribue les phénomènes lumineux à des vibrations transversales de l'éther, et si l'on admet, comme la théorie porte à le croire, que dans le vide, c'est-à-dire dans l'éther isolé, les rayons de diverses couleurs se propagent avec des vitesses qui ne soient pas rigoureusement égales, alors il suffira que la clarté d'une étoile varie dans un temps peu considérable pour qu'à des distances suffisamment grandes cette variation occasionne un changement de couleur. Cette proposition remarquable est due à M. Arago. On peut l'établir, comme il l'a fait lui-même, par la méthode analytique qui, dans les éléments d'algèbre, sert à résoudre la question

connue sous le nom de *Problème des deux couriers*. En effet, considérons une étoile blanche qui paraisse et disparaisse périodiquement, et pour plus de simplicité supposons que cette étoile, après avoir constamment brillé du même éclat pendant un certain temps t, reste invisible pendant un autre temps encore égal à t; admettons d'ailleurs que ces deux phénomènes se reproduisent l'un après l'autre indéfiniment, et que la couleur blanche de l'étoile résulte de la superposition de deux rayons simples dont les couleurs soient complémentaires; d'un rayon rouge, par exemple, et d'un rayon vert; enfin supposons que les vitesses de propagation de ces deux rayons n'étant pas rigoureusement égales, la plus petite soit représentée par v, la plus grande par v_1, en sorte qu'on ait $\frac{v_1}{v} = 1 + \frac{1}{n} = \frac{n+1}{n}$, n désignant un nombre très considérable. Les temps que ces deux rayons, partant simultanément de l'étoile dans une direction commune, devront employer pour se propager en ligne droite jusqu'à un point donné de l'espace, seront réciproquement proportionnels à leurs vitesses de propagation. En d'autres termes, ces temps seront entre eux dans le rapport de v à v_1, ou de n à $n + 1$. Donc, si à partir de l'étoile on porte sur la direction commune des deux rayons, des longueurs égales, dont chacune soit parcourue par le rayon doué de la plus grande vitesse v_1 dans un intervalle de temps représenté par nt, et si l'on nomme e_1, e_2, e_3, e_4,... les divers points auxquels aboutissent les extrémités de ces diverses longueurs, le rayon doué de la moindre vitesse v parcourra chacune de ces mêmes longueurs dans un intervalle de temps représenté par le produit

$$(n+1)t = nt + t.$$

Donc, pour des observateurs placés aux points e_1, e_2, e_3, e_4, le retard d'un rayon sur l'autre se trouvera successivement exprimé par t, $t+t$, $t+t+t$,... ou, ce qui revient au même, par les divers termes de la progression arithmétique t, $2t$, $3t$, $4t$...

102. Cela posé, puisqu'au point de départ e les deux rayons restent simultanément visibles ou simultanément invisibles pendant des intervalles de temps qui sont tous égaux à t, on peut affirmer qu'il en sera de même au point où le retard de l'un des rayons sur l'autre se trouvera représenté par l'un des nombres $2t$, $4t$,... c'est-à-dire

aux points e_2, e_4,... séparés de l'étoile E par des distances que le rayon doué de la plus grande vitesse parcourt en temps égaux aux divers termes de la progression arithmétique $2nt$, $4nt$... Au contraire, les deux rayons se montreront successivement et toujours l'un sans l'autre aux points où le retard de l'un à l'égard de l'autre se trouvera exprimé par l'un des nombres t, $3t$,... c'est-à-dire aux points e_1, e_3,... séparés de l'étoile E par des distances que le rayon doué de la plus grande vitesse parcourt en temps égaux aux divers termes de la progression arithmétique nt, $3nt$... En général, vue d'un point quelconque de l'espace, l'étoile paraîtra périodique, $2t$ étant la durée de la période au bout de laquelle les mêmes phénomènes se reproduiront, et de plus l'aspect de ces phénomènes variera périodiquement avec la distance qui séparera le spectateur de l'étoile. Si cette distance est celle de l'un des points e_2, e_4,... c'est-à-dire celle que parcourt le rayon doué de la plus grande vitesse dans un temps représenté par un multiple pair de nt; alors, d'après ce qu'on vient de dire, l'étoile paraîtra blanche durant une moitié de la période au bout de laquelle les mêmes phénomènes se reproduisent, et disparaîtra complétement durant l'autre moitié. Si, au contraire, la distance du spectateur à l'étoile est celle de l'un des points e_1; e_3,... c'est-à-dire celle que parcourt le rayon doué de la plus grande vitesse dans un temps représenté par un multiple impair de nt, l'étoile restera toujours visible, mais elle paraîtra rouge durant une moitié de la période, et verte durant l'autre moitié. Enfin, si la distance du spectateur à l'étoile n'est celle d'aucun des points e_1, e_2, e_3, e_4,... l'étoile visible et blanche durant une partie de la période disparaîtra durant une autre partie, et ces deux parties égales entre elles, mais dont chacune sera inférieure à la demi-période, se trouveront séparées l'une de l'autre par des intervalles de temps égaux pendant lesquels l'étoile se montrera colorée tantôt en rouge et tantôt en vert.

103. Dans l'hypothèse que nous venons de considérer, les points d'où l'on observe les mêmes phénomènes, par exemple les points pour lesquels l'étoile reste invisible durant une moitié de la période et brille de tout son éclat durant l'autre moitié, sont évidemment situés sur les surfaces de sphères concentriques qui, ayant l'étoile pour centre commun, renferment entre elles des couches dont l'épais-

seur est la distance que parcourt le rayon doué de la plus grande vitesse durant un temps $2nt$ égal au produit de la période $2t$ par le nombre n. En d'autres termes, pour obtenir la distance mesurée sur la direction d'un rayon et au bout de laquelle les mêmes phénomènes se reproduisent, il suffit de multiplier le nombre $n = \frac{v}{v_1 - v}$ par la distance à laquelle se propage durant le temps même de la période le rayon doué de la plus grande vitesse. Cette dernière distance sera toujours très considérable, et déjà elle s'élèverait à plus de six mille millions de lieues si la durée de la période se réduisait à un seul jour. La distance au bout de laquelle les mêmes phénomènes se reproduiront sera beaucoup plus considérable encore, puisqu'elle sera le produit de l'autre distance par le nombre n, dont la valeur en vertu de la formule $n = \frac{v}{v_1 - v}$ deviendra d'autant plus grande que la différence entre les vitesses v et v_1 deviendra plus petite.

On arriverait donc à des résultats semblables, si la durée de la période restant égale à $2t$, les deux rayons simples, dont la superposition est censée produire la couleur blanche de l'étoile, s'éteignaient périodiquement durant des intervalles de temps égaux entre eux, mais inférieurs ou supérieurs à la moitié de la période; ou si ces deux rayons, sans s'éteindre complétement, perdaient périodiquement une partie de leur éclat. Alors la distance au bout de laquelle se reproduiraient les mêmes phénomènes serait toujours celle que nous venons de calculer. Alors aussi, vue de certains points, l'étoile à certaines époques paraîtrait colorée, tandis que, pour des observateurs placés en d'autres points, elle se montrerait toujours blanche lorsqu'elle ne serait pas invisible. Seulement, dans la nouvelle hypothèse, les deux couleurs pourraient être mêlées de blanc, et les intervalles de temps pendant lesquels l'étoile paraîtrait blanche et colorée seraient plus longs ou plus courts que dans la première supposition.

On arriverait toujours à des conclusions du même genre, si la lumière blanche de l'étoile résultait de la superposition de plus de deux rayons simples; et dans ce cas encore comme dans les hypothèses ci-dessus admises, l'étoile vue de loin devrait paraître le plus ordinairement colorée. Il y a plus, il faudrait encore supposer

remplies certaines conditions particulières, pour qu'à de très grandes distances les phénomènes observés dans le voisinage de l'étoile parvinssent à se reproduire exactement. Admettons, pour fixer les idées, que la lumière blanche de l'étoile résulte de la superposition de trois rayons qui se propagent avec des vitesses représentées par v, v_1, v_2, soit toujours $2t$ la durée de la période, et posons

$$\frac{v_1}{v} = 1 + \frac{1}{n_1}, \quad \frac{v_2}{v} = 1 + \frac{1}{n_2}.$$

Si les nombres n_1, n_2, qu'on doit supposer très grands l'un et l'autre, sont commensurables entre eux, c'est-à-dire, en d'autres termes, si le rapport $\frac{n_2}{n_1}$ est rationnel, on pourra déterminer une distance au bout de laquelle se reproduiront exactement les mêmes phénomènes, et cette distance sera celle que parcourt le rayon doué de la vitesse v dans un temps égal au plus petit des multiples de $2n_1t$, qui soit aussi un multiple de $2n_2t$. Mais si le rapport $\frac{n_2}{n_1}$ devient irrationnel, il deviendra impossible de trouver un multiple de $2n_1t$ qui soit en même temps un multiple de $2n_2t$, et il deviendra pareillement impossible de trouver une distance au bout de laquelle les mêmes phénomènes se reproduisent exactement pendant toute la période $2t$. Alors, par exemple, les phénomènes que l'on observe dans le voisinage de l'étoile ne pourront plus se reproduire en d'autres points de l'espace, et pour un observateur placé loin de l'étoile, celle-ci ne pourra demeurer constamment blanche tant qu'elle sera visible.

104. En résumé, si dans le vide les vitesses de propagation des rayons diversement colorés ne sont pas rigoureusement égales, un changement périodique de clarté dans une étoile suffira pour occasionner à de grandes distances des changements de couleur. Or, parmi les astres dont la clarté varie périodiquement, on doit surtout distinguer Algol ou β de Persée, dont l'éclat ordinaire étant celui d'une étoile de deuxième grandeur, reste tel pendant $2^j\,14^h$, puis décroît soudain, de telle sorte qu'au bout d'environ $3^h\,1/2$, l'étoile se trouve réduite à la quatrième grandeur, sa lumière ayant alors perdu plus de la moitié de son intensité. Alors aussi l'étoile recommence à croître pour reprendre au bout de $3^h\,1/2$ son éclat habituel, l'étendue entière de sa période

étant d'environ $2^j\ 20^h\ 48^m$. Cela posé, concevons que l'on observe attentivement la couleur d'Algol, tandis que son éclat diminue. Si l'intervalle de temps renfermé entre les deux instants qui nous laissent apercevoir des rayons rouges et violets partis simultanément de l'étoile s'élevait seulement à un quart d'heure, elle changerait de couleur d'une manière assez notable pour que le changement pût être remarqué. En effet, puisque l'astre aura perdu plus de la moitié de sa lumière en $3^h\ 1/2$, la perte moyenne de lumière en un quart d'heure surpassera le rapport $\frac{1/4}{3\ 1/2}$ ou 1/14, et il n'est pas douteux que cette perte subie dans l'hypothèse admise par un seul des deux rayons rouges et violets occasionnât une variation appréciable dans la couleur. Toutefois cette variation est demeurée insensible dans les expériences entreprises par M. Arago pour la constater. Cherchons maintenant ce que l'on peut en conclure relativement à l'intervalle qui sépare deux molécules voisines du fluide éthéré.

105. Vu la distance considérable qui sépare de la terre les étoiles les plus rapprochées, distance que la lumière ne peut franchir en moins de trois ou quatre années, un quart d'heure n'équivaut pas, comme on l'a déjà dit, à la cent millième partie du temps que la lumière emploie pour venir d'Algol jusqu'à nous. Donc, en admettant que deux rayons, l'un rouge, l'autre violet, partis simultanément de cette étoile, se suivent d'assez près pour que l'un ne soit pas d'un quart d'heure en retard sur l'autre, nous admettons par cela même, non seulement que le rapport entre les vitesses de propagation de ces deux rayons diffère très peu de l'unité, mais encore que la différence est au-dessous d'un cent millième. Cela posé, si l'on adopte comme rigoureuse, pour l'éther considéré isolément, la loi de répulsion précédemment énoncée, c'est-à-dire si l'on suppose que l'action mutuelle de deux molécules d'éther soit répulsive et réciproquement proportionnelle au bicarré de la distance, la formule :

$$\frac{\epsilon}{l} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{14\left(\frac{v_1}{v} - 1\right)\left(\frac{v_1}{v} + 1\right)}{\left(\frac{t}{t_1} - 1\right)\left(\frac{t}{t_1} + 1\right)}}$$

que l'on déduit de la théorie, et dans laquelle ϵ est la distance de

deux molécules voisines, et l la longueur de l'onde, fournira le moyen de calculer une limite supérieure à l'intervalle qui sépare deux molécules voisines du fluide éthéré. En effet, désignons par l, l_1, t, t_1, les longueurs d'ondulation et les durées des vibrations moléculaires dans les rayons rouges et violets, et par v, v_1, les vitesses de propagation de ces rayons dans le vide, les rapports entre les durées t, t_1, et l'intervalle de temps qui résulte de la division d'une seconde sexagésimale en mille millions de millions de parties égales, seront représentés à très peu près par les nombres 2 et 1,39, en sorte qu'on aura sensiblement :

$$\frac{t}{t_1}=\frac{2}{1,36}=1,47,\ \left(\frac{t}{t_1}\right)^2=2,16.$$

Cela posé, la formule donnera, pour le rapport entre la distance ε de deux molécules d'éther voisins et la longueur l :

$$\frac{\varepsilon}{l}=\frac{1}{\pi}\sqrt{\left[\frac{14\left(\frac{v_1}{v}-1\right)\left(\frac{v}{v}+1\right)}{1,16}\right]},$$

ou à très peu près, puisque $\frac{v_1}{v}$ diffère très peu de l'unité

$$\frac{\varepsilon}{l}=\frac{2}{\pi}\sqrt{\left[\frac{7}{1,16}\left(\frac{v_1}{v}-1\right)\right]}.$$

Pour que la valeur de ε reste réelle, on devra évidemment dans la formule qui précède supposer le rapport $\frac{v_1}{v}$ supérieur à l'unité. Si d'ailleurs on suppose la différence entre ce rapport et l'unité réduite à un cent millième, alors de cette équation jointe à la formule :

$$\frac{v_1}{v}=1+\frac{1}{100000},$$

on conclura $$\frac{\varepsilon}{l}=\frac{2}{100}\,\frac{1}{\pi}\sqrt{\left(\frac{70}{116}\right)}=0,005\ldots$$

En vertu de cette dernière formule, ε serait environ cinq millièmes ou 1/200 de la longueur d'ondulation des rayons rouges,

c'est-à-dire 3 millionièmes de millimètre. On voit ainsi quelle est la petitesse de la limite supérieure à la distance qui sépare deux molécules voisines d'éther, lorsqu'en adoptant la loi d'une répulsion réciproquement proportionnelle au bicarré de la distance, on part de ce fait que l'observation d'Algol ne fournit point de traces de la dispersion des couleurs dans le vide.

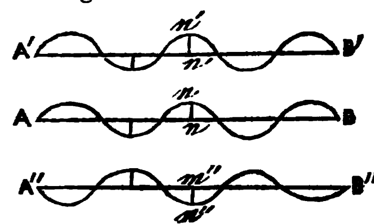
Il est bon de remarquer qu'en vertu de la formule

$$\frac{v_1}{v} = 1 + \frac{1}{100000},$$

la vitesse de propagation des rayons violets surpasserait celle des rayons rouges, en sorte que les rayons qui se propagent plus rapidement dans les corps se propageraient au contraire avec plus de lenteur dans le vide.

Interférence de la lumière. — 106. Si deux ondes lumineuses, provenant de deux centres d'ébranlement, atteignent au même instant un certain point de l'espace, les particules d'éther en ce point seront mises en vibration par chacune des ondes, et recevront par conséquent deux impulsions dont les effets se combineront pour donner naissance a des phénomènes que nous allons étudier avec soin. Il a été démontré par l'analyse que si l'on communique à un même point matériel deux ou plusieurs impulsions très petites, chacune de ces impulsions subsistera et produira tout son effet indépendamment des autres, de telle sorte que l'impulsion réelle et totale du point sera la résultante des impulsions primitives considérées comme séparées et distinctes. En cela consiste, comme nous l'avons déjà dit, le principe de la superposition des petits mouvements : un exemple bien simple fera ressortir la vérité de ce principe fondamental. Supposons qu'un pendule reçoive une première impulsion dans un plan passant par l'axe de suspension ; l'effet de cette impulsion sera de faire osciller le pendule dans le plan dont il s'agit. Concevons maintenant qu'au moment où le pendule oscillant est parvenu au point le plus bas de sa course, on lui imprime une seconde impulsion dans un plan perpendiculaire au premier ; si la seconde impulsion avait été seule, elle aurait fait osciller le pendule dans le second plan en lui faisant parcourir un certain arc ; or, en mesurant avec soin la distance du pendule à la verticale

dans l'un quelconque des deux plans verticaux, on trouvera que cette distance est réellement à chaque instant ce qu'elle serait si l'autre impulsion n'avait pas existé, et l'on en conclura que les deux impulsions existent simultanément, indépendamment l'une de l'autre : de leur ensemble d'ailleurs résulte une oscillation elliptique. Si les deux impulsions primitives ont lieu dans un même plan, il est évident que la vibration résultante sera leur somme si elles agissent dans le même sens ou si elles s'accordent, leur différence si elles agissent en sens contraire. Revenons à la lumière, et supposons que deux ondes sont parties au même instant de deux centres lumineux, que nous supposerons, pour plus de simplicité, d'égale intensité et très rapprochés ; puis, concevons qu'une particule d'éther placée à distance soit mise en vibration par les impulsions simultanées de ces deux ondes ; si nous admettons de plus que les deux impulsions sont dans le même plan, l'amplitude de la vibration résultante sera double si les deux ondes s'accordent, nulle si les deux ondes agissent dans des directions opposées. Il est, de plus, évident que les vibrations initiales s'accorderont, et que par conséquent la vibration résultante sera double si les ondes, au moment de leur arrivée, étaient dans une même phase, et qu'au contraire les vibrations initiales agiront en sens contraire si elles arrivent dans des phases opposées. Supposons, pour fixer les idées, que les ondes soient planes et représentées par les sinusoïdes A B, A′ B′ : la distance de la particule d'éther à sa position de repos sera représentée par l'ordonnée ou par la perpendiculaire à l'axe ou à la ligne moyenne de l'onde.



Dès lors, si l'on superpose l'onde A′ B′ à l'onde A B, comme les points correspondants de ces deux ondes sont dans une même phase de vibration, la distance de chaque particule à l'axe après la superposition sera évidemment doublée. Si, au contraire, on superpose à l'onde A B l'onde A″ B″, telles que les points correspondants soient dans des phases opposées, chaque particule sera sollicitée par deux impulsions $m\,n$, $m''\,n''$ égales et de sens contraire ; sa distance à l'axe sera donc nulle, et elle occupera sa position d'équilibre ou de repos.

Nous avons considéré, pour plus de simplicité, le cas extrême, celui où les ondes simultanées sont en complet accord ou en complète opposition. Dans les cas intermédiaires, la direction et l'amplitude de la plus grande des vibrations seront modifiées suivant des lois semblables à celles qui président à la composition des forces.

107. Il résulte donc des premiers principes de la théorie des ondes que deux rayons lumineux, en s'influençant mutuellement, peuvent ou produire un effet plus grand, ou s'affaiblir mutuellement, se détruire même et donner naissance par leur ensemble à une complète obscurité, de sorte que de la lumière jointe à de la lumière ne produise que des ténèbres.

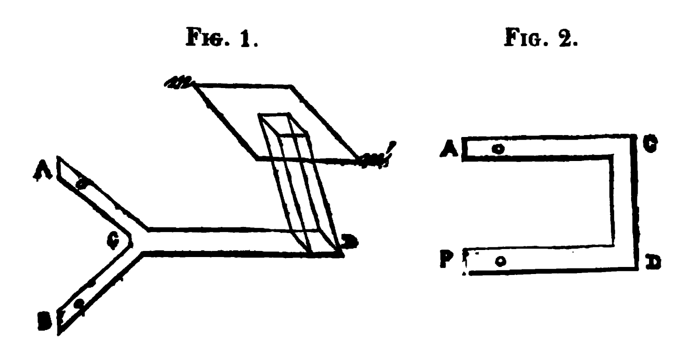
Avant de suivre dans leurs développements les inductions de la théorie, il est bon de faire observer que ce que nous venons de dire par rapport aux vibrations lumineuses est entièrement analogue à ce que l'on observe partout où il existe des mouvements vibratoires. Si deux ondes liquides arrivent dans le même instant au même point de l'espace, de telle sorte que le relief de l'une coïncide avec le relief de l'autre, on voit ces deux reliefs s'ajouter; le relief de 'onde résultante est la somme des reliefs des ondes primitives. Si, au contraire, le creux d'une onde vient à se superposer au relief d'une autre onde, ils se détruisent en partie, et le relief de l'onde résultante, égal à la différence des reliefs primitifs, disparaît entièrement si les deux premières ondes étaient égales.

Nous avons un magnifique exemple de ces influences mutuelles dans le phénomène bien connu des grandes et des petites marées: l'onde qui constitue la marée est, dans le premier cas, la somme des marées solaire et lunaire; dans le second cas, elle est leur différence. Une particularité curieuse que l'on observe dans les marées du port de Batsha fournit un exemple, plus frappant encore, de l'interférence des ondes. Le flot dont se compose la marée atteint le port par deux canaux dont la différence de longueur est telle, que le temps de l'arrivée par l'un surpasse précisément de six heures le temps de l'arrivée par l'autre. Il en résulte que quand le relief de l'une des ondes, ou la plus grande eau, atteint le port par un des canaux, il est rencontré par le creux de l'autre. Ces effets simultanés d'élévation et de dépression se détruisent en totalité ou en partie. Dans certaines saisons, lorsque les marées du matin et du soir sont égales, il n'y a plus dès lors de marée dans le port de Batsha, tandis

que dans les autres saisons il n'y a qu'une seule marée, dont l'élévation est la différence des hauteurs des marées ordinaires du matin et du soir.

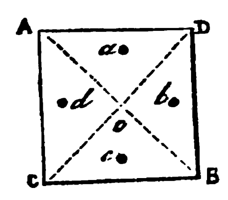
M. Whewell a remarqué dernièrement que l'inégalité irrégulière des marées dans le port de Londres devait être attribuée à une cause semblable, et provenait de ce que la marée se compose en réalité de deux ondes, dont l'une atteint immédiatement le port par le canal d'Angleterre, tandis que l'autre arrive douze heures plus tard, après avoir fait le tour des côtes de la mer du Nord.

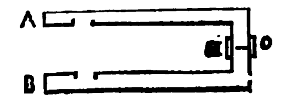
108. La coexistence des ondulations sonores amene les mêmes effets : on a cru longtemps que la coïncidence de deux ondes produit ce qu'on appelle en acoustique des battements. Il y aura, en général, interférence quand une onde condensée rencontrera une onde dilatée ; une expérience encore peu connue met ce phénomène tout-à-fait en évidence. On prend un tube composé de deux branches exactement égales, terminées à un tronc commun, fig. 1 et 2. Il est évident que si les particules d'air sont mises à la fois dans les deux branches dans un même état de vibration, de telle sorte que les dilatations et les condensations se correspondent exactement, une vibration double se propagera dans le tube intermédiaire C D, et pourra être mise en évidence au moyen d'une membrane *mm'* couverte de sable et mise en communication avec l'extrémité D du tube. Si, au contraire, les particules d'air dans les deux branches sont



mises dans des états de vibrations opposées, de telle sorte que les condensations de l'une correspondent aux dilatations de l'autre, aucune vibration ne se propagera dans le tronc, le sable restera

pleinement en repos. Pour réaliser toutes les conditions nécessaires à la production des phénomènes que nous venons de décrire, il suffit de placer les ouvertures faites à l'extrémité des branches des tubes sur les parties d'une plaque vibrante qui sont dans des états de vibrations semblables ou opposés. Si, par exemple, on se sert d'une plaque carrée à laquelle on fait rendre un son tel que les lignes des nœuds soient les deux diagonales A B, C D, la plaque aura quatre ventres de vibration maximum. De plus, si la portion A O C s'élève, il en sera de même de la portion D O B, tandis que les portions A O D et C O B s'abaisseront, de telle sorte que *a* et *c* sont des centres de vibrations semblables, *a* et *b* des centres de vibrations opposées. On aura donc dans les deux branches des états de vibrations opposées ou semblables, suivant que l'on placera leurs ouvertures ou sur deux ventres consécutifs, ou sur deux ventres alternés. Si la plaque est tellement choisie que le son qu'elle rend avec deux lignes de nœuds diagonales soit précisément le son fondamental des deux branches du tube, c'est-à-dire si la plaque excitée, comme nous l'avons dit, vibre à l'unisson des branches du tube, on entendra les branches du tube résonner fortement quand leurs ouvertures seront placées sur deux ventres alternés, tandis que l'on n'entendra que le seul son de la plaque si les deux ventres sont consécutifs : ici donc du son uni à du son donne le silence. Il est un mode d'expérimentation plus simple encore. Quand, en s'élevant, la portion supérieure A O C de la plaque peut donner naissance à une onde condensée, la partie inférieure peut faire naître une onde dilatée ; si donc on prend un tube semblable à celui qui est dessiné dans cette figure, dont les dimensions soient telles que chaque branche puisse vibrer à l'unisson de la plaque, et qu'on place le ventre de vibration entre les deux branches, on n'entendra pas d'autre son que celui de la plaque. Si, de plus, le tube est tellement construit que les deux branches puissent tourner sur une certaine ligne C D, et que, par un mouvement de rotation, on éloigne une des branches du ventre de vibrations, la branche restante





fera entendre un son très distinct ; on éteindra ce son en ramenant la première branche, qui, laissée seule, résonnerait comme la seconde, de sorte qu'il est alors bien évident que du son ajouté à du son produit du silence. En écartant suffisamment les deux branches de ce même petit appareil, on pourra les placer sur deux ventres consécutifs, ce qui produira encore du silence, parce que l'une est en dessus et l'autre en dessous, ou sur deux ventres alternés, ce qui donnerait naissance à un son double, etc. M. Lloyd assure que l'idée de ces ingénieuses expériences est due à M. Hopkins. Nous les avons souvent répétées en présence de plusieurs physiciens distingués, avec d'excellents appareils construits par M. Marloye.

109. Deux rayons lumineux doivent pouvoir donner de l'obscurité, comme deux ondes sonores produisent le silence, comme deux ondes liquides produisent le niveau. Mais nous ne sommes pas réduits à conclure seulement par analogie l'existence des interférences lumineuses ; cette existence, qui constitue l'un des faits les plus curieux et les plus importants de l'optique, est démontrée par les expériences les plus directes et les plus convaincantes. Nous verrons même qu'on retrouve les interférences dans une multitude de cas où leur présence n'était pas soupçonnée.

La gloire de la découverte de cette grande loi de l'interférence de la lumière appartient réellement au jésuite Grimaldi, quoiqu'il ait été réservé au fameux physicien anglais Young de l'établir et de la formuler nettement. Grimaldi avait énoncé ce fait, qu'un corps éclairé peut devenir obscur par une adjonction de lumière. Voici comment il le prouvait. Supposons qu'on fasse pénétrer un rayon de lumière dans la chambre obscure à travers deux petites ouvertures étroites, circulaires et égales ; ces rayons donnent naissance à deux cônes lumineux divergents, qui sont chacun entourés de deux pénombres moins éclairées. Si maintenant on reçoit les deux rayons sur un écran, de telle sorte que les pénombres des deux cônes empiètent l'une sur l'autre, on remarquera que, quoique la plus grande partie de l'espace doublement éclairé soit plus brillante que la pénombre d'un seul cône, cependant les limites ou contours des deux portions superposées sont beaucoup plus sombres que les parties des pénombres qui n'empiètent pas l'une sur l'autre. De plus, si l'on intercepte par un écran un des deux rayons, ces con-

tours sombres reprennent l'éclat du reste de la pénombre. Il est donc vrai qu'une addition de lumière peut occasionner l'obscurité et que réciproquement une soustraction de lumière peut amener une augmentation d'éclat.

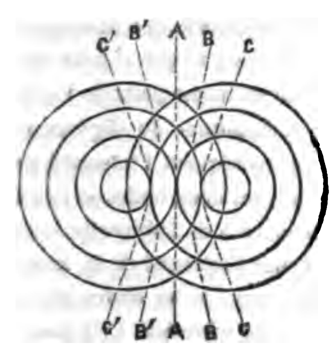
Cette ingénieuse et intéressante expérience a pris entre les mains d'Young un caractère plus saillant et plus décisif. Si on substitue aux ouvertures circulaires de Grimaldi deux petites fentes placées très près l'une de l'autre, et si on remplace la lumière ordinaire par de la lumière homogène, on observe sur l'écran une série de bandes alternativement brillantes et obscures formées aux points où les ondes provenant des deux centres s'accordent ou sont opposées. On prouve que ces alternatives de lumière et d'obscurité ont pour cause l'action mutuelle des deux rayons, par ce fait que, si l'on intercepte un des rayons en fermant une des ouvertures, les franges disparaissent entièrement, la lumière reprend partout la même intensité : ce qui montre que quand on supprime un des centres lumineux, les intervalles obscurs redeviennent lumineux. Il est bien constaté par là que l'obscurité observée est due à l'adjonction de lumière, ou à l'influence que le second rayon lumineux exerce sur le premier.

Pour mieux faire ressortir les circonstances singulières de ce phénomène, considérons ce qui se passe dans un cas d'interférence plus simple, et qui nous est plus familier.

110. Si on laisse tomber à la fois deux pierres parfaitement égales dans un bassin ou réservoir d'eau stagnante, on voit naître deux séries d'ondes circulaires, qui ont pour origine les deux centres d'ébranlement, et la rencontre de ces deux systèmes d'ondes donne naissance à des phénomènes semblables à ceux que nous venons de décrire dans le cas de la lumière. Pour les mieux analyser, désignons par R_1, C_1, R_2, C_2,... les ondes alternativement en relief et en creux du premier système par R', C', R'', C'',... les ondes du second; appelons d_1, c_1, d_2, c_2,... d', c', d'', c'',... les distances de ces diverses ondes à leurs centres respectifs, et supposons que, R_1, R' étant des ondes équidistantes de ces centres et les premières qui arrivent au contact, on ait $d_1 = d'$, $d_1 + d' = R + R'$. Si l est ce que nous avons nommé la longueur de l'onde, ou la distance de deux points placés dans des états semblables de mouvement, de deux sommets d'ondes en relief par exemple, on aura évidemment

$c_1 = d_1 + \frac{1}{2} l$, $d_2 = d_1 + l$, etc., $c' = d' + \frac{1}{2} l$, $d'' = d' + l$, etc.

Cela posé : 1° si deux reliefs quelconques R, R',... se rencontrent, ils s'ajoutent, et l'on voit apparaître une proéminence plus forte; 2° si un relief R_1 se superpose à un creux C' du second système, ils se compensent ou se nivellent mutuellement; l'eau du bassin reprend son premier niveau, comme si elle n'avait pas été ébranlée. Il est évident que ces influences mutuelles s'exerceront sur plusieurs points à la fois, et que la surface liquide se trouvera comme partagée en deux séries de points : les uns de déplacement double, les autres de déplacement nul. Les points de ces deux séries seront situés sur certaines lignes droites ou courbes qui seront leurs lieux géométriques. Une première ligne AA de déplacement double sera déterminée par la rencontre de R_1 avec R', de R_2 avec R'', etc. Cette ligne est nécessairement droite et perpendiculaire à la ligne des centres d'ébranlement, puisque tous ses points sont à égales distances de ces centres. Deux nouvelles lignes de déplacement double BB, B' B' seront formées à droite et à gauche de AA par les rencontres de R_1 avec R'', R_2 avec R''',... ou de R' avec R_2, R'' avec R_3,.... c'est-à-dire qu'elles seront le lieu de tous les points, dont les distances au centre d'ébranlement diffèrent entre elles de la longueur d'une onde; car on a



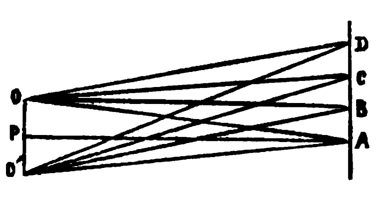
$$d'' - d_1 = d'' - d' = l,\ d''' - d_2 = d''' - d'' = l, \ldots$$
$$d_2 - d' = d_2 - d_1 = l,\ d_3 - d'' = d_3 - d_2 = l \ldots$$

Deux autres lignes de déplacement double CC, C'C' seront données par les rencontres successives de R_1 avec R''', R_2 avec R^{IV}, ou R' avec R_3, R'' avec R_4, c'est-à-dire par l'ensemble des points dont les distances aux centres d'ébranlement diffèrent de deux longueurs d'onde; on a, en effet, $d''' - d = d'' - d' = 2\,l \ldots$ En général, toutes les ondes, dont les distances au centre d'ébranlement différeront entre elles d'un multiple pair ou impair de la lon-

gueur d'ondulation, ou d'un nombre entier d'ondulations, donneront naissance à des lignes de déplacement double. Toutes ces lignes seront évidemment des hyperboles, dont les centres d'ébranlement occupent les foyers. Elles seront séparées par des lignes intermédiaires lieux géométriques des points dont les distances aux centres d'ébranlement diffèrent d'une demi-onde $\frac{l}{2}$, ou d'un nombre impair de demi-ondes. Ces dernières hyperboles, en tout semblables aux premières, seront précisément les lignes de déplacement nul provenant de la rencontre des ondes en relief R_1, R_2, R_3,... avec les ondes en creux C', C'', C''', ou R', R'', R''' avec C_1, C_2, C_3, etc. etc.

111. Tout ce que nous venons de dire s'applique exactement à la lumière considérée au point de vue de la théorie des ondulations. Nous avons vu qu'il résulte de cette théorie : 1° que si deux ondes lumineuses d'intensités égales atteignent un même point de l'espace dans une même phase de vibration, l'amplitude du déplacement de la molécule devient double, et par conséquent l'intensité de la lumière quadruple; 2° qu'au contraire, les deux ondes se neutralisent mutuellement, et donnent naissance à de l'obscurité si elles arrivent dans des phases opposées; 3° que l'intensité de la lumière sera intermédiaire entre ces deux extrêmes, si les ondes se rencontrent dans des phases intermédiaires de vibration. Cela posé, il est aisé de comprendre de quelle manière se produisent les bandes alternativement brillantes et obscures. En effet, les ondes, quelles que soient leurs longueurs, se propagent dans un même milieu avec la même vitesse; dès lors si deux ondes de longueurs égales partent en même temps de deux centres, elles arriveront au même point dans la même phase, si les chemins qu'elles ont parcourus sont égaux ou diffèrent d'un nombre entier de longueurs d'onde. Elles se rencontreront dans des phases opposées, si les chemins parcourus diffèrent d'une demi-ondulation ou d'un nombre impair de demi-ondulations. La bande centrale, brillante et rectiligne, se compose par conséquent des points pour lesquels les chemins parcourus sont égaux. Les deux bandes brillantes voisines sont formées des points pour lesquels les chemins parcourus diffèrent d'une longueur d'onde; les suivantes, des points pour lesquels les chemins parcourus diffèrent de trois longueurs d'onde, et ainsi de suite... De

même, les deux premières franges obscures à droite et à gauche se composent des points pour lesquels les chemins parcourus diffèrent d'une demi-ondulation; les deux suivantes, des points pour lesquels les chemins parcourus diffèrent de trois demi-ondulations, etc., etc.

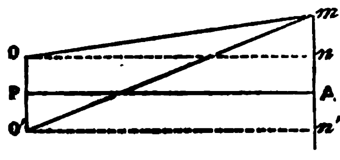


Ainsi, dans l'expérience d'Young, si la lumière provenant des deux ouvertures O et O' est reçue sur l'écran A D, on voit que la bande brillante centrale se forme au point A où l'écran est rencontré par la perpendiculaire A D qui divise en deux parties égales l'angle O A O' formé par les deux pinceaux de lumière. Il y aura à droite et à gauche de la bande brillante centrale deux bandes obscures, puis deux nouvelles bandes brillantes, etc. Si l'on mesure les distances de l'une de ces bandes aux deux ouvertures, on trouve que leur différence BO' — BO est une quantité constante, quelle que soit la position de l'écran. Cette différence est précisément la longueur d'une onde. Pour la bande brillante suivante, on trouverait que la distance CO' — CO des chemins parcourus est double de la première ou égale à deux ondulations entières : plus généralement, on verra que les distances aux deux ouvertures pour un point correspondant à une bande brillante diffèrent entre elles d'un multiple de la première différence BO' — BO, ou d'un nombre entier d'ondulations. Les mêmes mesures appliquées aux bandes obscures intermédiaires prouveront que les différences des chemins parcourus sont égales à une demie, à trois demies, à cinq demies; plus généralement à un nombre impair de demi-ondulations.

La différence des distances aux deux ouvertures étant constamment la même pour tous les points d'une même bande, il en résulte que cette bande sera une hyperbole dont les foyers coïncideront avec les deux ouvertures. La courbure de toutes ces hyperboles sera très petite, excepté près du sommet, de sorte qu'elles se confondront sensiblement avec leurs asymptotes.

112. Quand on connait l'intervalle qui sépare les deux ouvertures

et la distance de l'écran, il est facile de déterminer la position des bandes. Cette position, pour une bande brillante et obscure, est déterminée par la condition que la différence $mo' - mo$ des distances aux deux ouvertures, sera un multiple de la longueur d'une demi-ondulation. Or, menons les lignes On, $O'n'$ parallèles à AP, et représentons AP par b, OO', qui est la distance des ouvertures, par c la distance inconnue Am de la bande par x, les triangles rectangles omn, $o'mn'$, donneront :



$$om = \sqrt{b^2 + \left(x - \frac{1}{2}c\right)^2}, \quad o'm = \sqrt{b^2 + \left(x + \frac{1}{2}c\right)^2}.$$

En développant par la formule du binôme, et remarquant que les quantités x et c sont très petites par rapport à b, on aura, en arrêtant ces développements aux seconds termes :

$$om = b + \frac{\left(x - \frac{1}{2}c\right)^2}{2b}, \quad o'm = b + \frac{\left(x + \frac{1}{2}c\right)^2}{2b}.$$

$$o'm - om = \frac{\left(x + \frac{1}{2}c\right)^2 - \left(x - \frac{1}{2}c\right)^2}{2b} = \frac{cx}{b}.$$

Mais cette différence doit être égale à un nombre entier $n\frac{l}{2}$ de demi-ondulations ; on aura donc $x = \frac{nbl}{2c}$. En donnant tour à tour à n dans cette formule si simple les valeurs paires $o, 2, 4, 6, \ldots 2n$ et les valeurs impaires $1, 3, 5, \ldots 2n + 1$, on aura les distances :

$$x = o \quad x = \frac{bl}{c}, \; x = \frac{2bl}{c}, \; x = \frac{4bl}{c} \ldots \; x = \frac{2nbl}{c}$$

$$x = \frac{bl}{2c}, \; x = \frac{3bl}{2c}, \; x = \frac{5bl}{2c}, \ldots \; x = \frac{(2n+1)bl}{2c}$$

des bandes successives, brillantes et obscures.

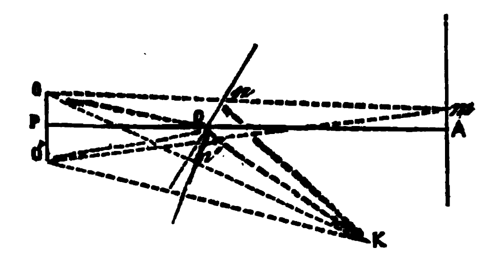
De cette même formule on tire $l = \frac{2cx}{nb}$, et l'on pourra par conséquent calculer la longueur de l'onde quand on aura mesuré les distances b, c et la valeur de x, correspondante à une valeur donnée de n, ou à une certaine bande. On a trouvé de cette manière que cette longueur d'onde était pour le rayon rouge extrême 0,0000266 de pouce, pour le rayon violet extrême 0,0000167, pour le rayon moyen du spectre 0,0000203, moins d'un 1/300000 de pouce.

113. Nous venons d'établir les bases fondamentales de la théorie des interférences, en nous appuyant sur les expériences et les raisonnements d'Young. Or, cette méthode n'est pas tout-à-fait exempte d'objections. On pourrait supposer que la lumière en rasant les bords des ouvertures éprouve des modifications d'une nature telle, qu'elles suffiraient à expliquer les effets observés. Il était donc très important de montrer que ces effets sont complétement indépendants des ouvertures ou des bords, que deux rayons quelconques partis d'une même source et qui se rencontrent sous une très petite obliquité interfèrent, quelles que soient d'ailleurs les circonstances de leur rencontre. C'est ce qu'a fait l'illustre Fresnel, et l'expérience qu'il a imaginée pour atteindre ce but est considérée avec raison comme la plus ingénieuse et l'une des plus belles et des plus concluantes de toute l'optique.

On place à côté l'un de l'autre deux miroirs formant entre eux un angle très obtus, et l'on fait tomber sur ces miroirs un rayon de lumière divergent émis du foyer d'une lentille; il en résulte deux rayons réfléchis qui forment entre eux un très petit angle. On a donc ainsi deux rayons issus d'une même origine, séparés simplement, par la réflexion sur des surfaces planes, sans polarisation, sans l'intervention de bords ou de toute autre influence quelconque: or, ces deux rayons interfèrent de la manière que nous avons dit plus haut, et produisent par leur action mutuelle des bandes alternativement brillantes et sombres. Pour s'assurer que ces bandes sont bien l'effet de l'action mutuelle des rayons, il suffit d'en intercepter un en couvrant le miroir qui le réfléchit : le système de bandes s'évanouit à l'instant tout entier.

Supposons que Q n, Q' n représentent les sections faites dans les deux miroirs que nous supposerons perpendiculaires au plan de la

figure, et concevons que K soit le centre lumineux ou le foyer de



la lentille qui concentre les rayons du soleil. Abaissons du foyer K deux perpendiculaires sur les deux miroirs, et prenons sur ces perpendiculaires prolongées deux longueurs égales aux distances du foyer aux miroirs; les points ainsi obtenus O, O', pourront être considérés comme les points de départ des rayons réfléchis. Cela posé, on verra 1° que les bandes sont parallèles à la ligne d'intersection des deux miroirs; 2° qu'elles sont placées symétriquement à droite et à gauche du plan qui passe par cette intersection, et par le point P milieu de la ligne OO'; 3° qu'en partant du miroir, ces bandes se prolongent suivant des arcs d'hyperbole, dont le centre commun est en P, et dont les foyers sont les points de départ O, O'.

Ces résultats sont parfaitement d'accord avec la théorie. En effet, puisque $O\,n = n\,k$ et $O'\,n' = n'\,k$, la différence entre les chemins parcourus par les rayons réfléchis $k\,n\,m$, $k\,n'\,m$ qui se rencontrent au point m, est la même que s'ils parvenaient à ce point après être partis des deux points O, O'. Donc tout ce que nous avons dit sur l'interférence des rayons qui partent de deux centres lumineux très voisins trouvera ici son application. Comme on a $K\,Q = O\,Q = O'\,Q$, la ligne P Q perpendiculaire sur le milieu de O O' aura tous ses points à égale distance des deux origines O et O'. Les bandes dès lors seront symétriques par rapport à cette ligne, et la distance A m d'une bande quelconque à la bande centrale sera donnée par la formule générale $x = \frac{n\,l}{2} \times \frac{A\,P}{O\,O'}$. On peut facilement ramener cette expression ou valeur de x à ne renfermer que les données de la question. On a, en effet, $P\,Q = O\,Q \cos O\,Q\,P = K\,Q \cos O\,Q\,P$, $O\,O' = 2\,O\,P = 2\,K\,Q \sin O\,Q\,P$. Mais puis

que les angles K Q O, K Q O′ sont divisés en parties égales par les lignes Qn et Qn', il est facile de voir que l'angle O Q P, moitié de O Q O′, est égal à l'inclinaison des deux miroirs. En désignant par i cette inclinaison, par a et b les distances K Q et Q A, on aura $OO' = 2a \sin i$, $AP = a \cos i + b = a + b$, puisque l'angle i est infiniment petit; on aura donc définitivement $x = \frac{(a+b)nl}{2a \sin i}$.

114. M. Lloyd a reconnu que le phénomène des interférences et des franges se produit dans tout son éclat quand on fait réagir l'un sur l'autre un rayon direct et un rayon réfléchi, et sous cette forme l'expérience est bien plus facile à réaliser que par le mode si ingénieux inventé par Fresnel. Il suffit de prendre une simple plaque de glace ou d'un miroir métallique, et de les placer dans une position telle, que les rayons partis du centre lumineux soient réfléchis sous un angle à très peu près égal à un angle droit. Un écran placé de l'autre côté du miroir recevra à la fois le rayon direct et le rayon réfléchi : ces deux rayons se rencontrant sous un très petit angle, et ayant parcouru des chemins sensiblement égaux, sont dans les conditions voulues d'interférence. Il est facile de voir que le système de bandes ainsi obtenues est la moitié seulement de celui qui se forme dans l'expérience de Fresnel.

Il est une autre manière plus facile et plus avantageuse sous plusieurs rapports d'étudier le phénomène fondamental des interférences. Il est évident que le rayon primitif peut être séparé par la réfraction comme il l'a été par la réflexion, et que si l'inclinaison des deux rayons réfractés est très petite, ils interféreront comme les rayons réfléchis. Il suffit pour obtenir cet effet d'avoir un prisme dont l'angle très obtus soit presque égal à 180°, et de faire tomber le rayon de lumière perpendiculairement à la face opposée à cet angle. Il est évident que le rayon sera diversement réfracté à sa sortie par les deux faces, et qu'il sera partagé en deux rayons réfractés partis d'un même centre formant entre eux un très petit angle, remplissant par conséquent toutes les conditions nécessaires pour leur interférence. L'expérience prouve, en effet, qu'on voit naître alors des séries de franges alternativement claires et sombres, parallèles à l'arête du prisme.

115. De tout ce que nous venons de dire, il résulte évidemment que dans tous les cas la bande brillante centrale et rectiligne produite par l'interférence de deux rayons est le lieu des points auxquels les deux rayons sont parvenus après des intervalles de temps égaux; on en conclut que si les deux rayons ont parcouru le même milieu ou des milieux de résistance égale sans avoir été arrêtés dans leur course par aucun obstacle étranger, les points de la ligne brillante centrale seront à égale distance des deux centres lumineux, puisque les rayons auront alors parcouru nécessairement des espaces égaux en temps égaux. Il n'en sera plus ainsi si l'on place sur le chemin de l'un des deux rayons une petite plaque mince prise dans un milieu plus dense; car alors si la lumière est retardée dans un milieu plus dense, il est évident que les points auxquels les rayons parviennent dans le même temps ne seront plus à égale distance des deux centres de vibration, qu'ils seront plus près de celui dont la lumière a éprouvé un retard; ce serait tout le contraire si la lumière se mouvait plus vite dans le milieu plus dense : la bande centrale et tout le système des franges s'approcherait donc, dans le premier cas, du côté où se trouve la plaque mince, elle s'en éloignerait dans le second. Or, l'expérience si ingénieusement conçue et exécutée par M. Arago a prouvé que la frange centrale s'approche réellement du côté où se trouve la plaque; donc la lumière est nécessairement retardée dans les milieux plus denses, contrairement aux exigences du système de l'émission, conformément aux principes fondamentaux de la théorie des ondulations, qui est seule vraie, seule admissible. La question est donc réellement décidée; la nouvelle et grande expérience annoncée par M. Arago n'ajoutera rien à l'évidence de la démonstration rigoureuse que nous venons de rappeler. Mettons cependant nos lecteurs au courant de ce magnifique projet. Voici le principe fondamental de la méthode que l'illustre secrétaire de l'Académie des sciences se propose de suivre.

116. Faisons tomber un rayon lumineux sur un miroir plan poli; il se réfléchira, comme tout le monde sait, en formant avec la surface du miroir un angle de réflexion exactement égal à l'angle d'incidence. Imaginons maintenant que le miroir vienne à tourner de la quantité angulaire α autour du point de la surface où la réflexion s'est opérée. Si ce mouvement augmente de α l'ancien angle d'incidence, il dimi-

nuera d'autant l'ancien angle de réflexion. Celui-ci, après le déplacement du miroir, sera donc plus petit que le premier de la quantité 2α, et il faudra l'augmenter de 2α pour le rendre égal au nouvel angle d'incidence. Ainsi, cet angle augmenté de 2α donnera la direction du rayon réfléchi dans la seconde position du miroir : ainsi, le rayon incident restant le même, un mouvement angulaire α du miroir occasionne un mouvement angulaire double dans le rayon réfléchi. On sait d'ailleurs que la réflexion sur un miroir plan n'altère jamais les positions relatives de deux rayons ; que si, avant de se réfléchir, ils étaient parallèles ou faisaient entre eux des angles de 1′, 10′, etc., ils seront parallèles encore après la réflexion ou feront entre eux les mêmes angles.

Admettons maintenant que deux rayons horizontaux partis de deux points voisins situés dans la même verticale viennent tomber sur deux points de la ligne médiane d'un miroir plan vertical, et supposons que ce miroir tourne uniformément et d'une manière continue autour d'un axe vertical dont le prolongement coïncide avec cette même ligne médiane. La direction suivant laquelle les deux rayons horizontaux se réfléchiront dépendra évidemment du moment où ils atteindront le miroir, puisque nous avons supposé qu'il tourne. Si les deux rayons sont partis simultanément des deux points rayonnants contigus, ils arriveront aussi simultanément au miroir ; leur réflexion s'opérera au même instant ; conséquemment dans une même position de la surface tournante ; conséquemment comme si cette surface quant à eux était immobile ; leur parallélisme primitif ne s'en trouvera donc pas altéré.

Pour que les rayons qui, primitivement, étaient parallèles divergeassent après leur réflexion, il faudrait que l'un d'eux arrivât au miroir plus tôt que l'autre ; il faudrait que, dans son trajet du point rayonnant à la surface réfléchissante, la marche de ce rayon fût accélérée ; ou bien, car le résultat serait précisément le même, il faudrait, la vitesse du premier rayon restant constante, que celle du second éprouvât une diminution ; il faudrait, enfin, que les deux rayons se réfléchissent l'un après l'autre, et dès lors les deux positions distinctes du miroir forment entre elles un angle sensible.

Suivant la théorie de l'émission, la lumière se meut dans l'eau notablement plus vite que dans l'air ; suivant la théorie des ondes,

c'est précisément le contraire : la lumière marche plus vite dans l'air que dans l'eau. Faisons en sorte qu'avant d'arriver au miroir un des rayons, le rayon supérieur par exemple, ait à traverser un tube rempli d'eau. Si la théorie de l'émission est vraie, le rayon supérieur sera accéléré dans sa marche ; il arrivera au miroir le premier ; il se réfléchira avant le rayon inférieur ; il formera avec lui un certain angle, et le sens de la déviation sera tel que le rayon inférieur paraîtra plus avancé que l'autre, qu'il semblera avoir été entraîné par le miroir tournant.

Admettons un moment la vérité de la théorie des ondes. Le tube d'eau retardera alors la marche du rayon supérieur ; ce rayon arrivera au miroir réfléchissant après le rayon inférieur ; il se réfléchira, non plus le premier, mais le second, mais sur une position de la face polie plus avancée : les deux rayons formeront entre eux le même angle que dans l'autre hypothèse ; seulement la déviation aura lieu en sens contraire, le rayon supérieur sera maintenant le plus avancé, toujours dans le sens de la rotation du miroir. En résumé, deux points rayonnants placés près l'un de l'autre, et sur la même verticale, brillent instantanément en face du miroir tournant : le rayon supérieur ne peut arriver au miroir qu'en traversant un tube rempli d'eau ; le second rayon atteint la surface réfléchissante sans avoir rencontré dans sa course aucun autre milieu que l'air. Pour fixer les idées, nous supposerons que le miroir, vu de la place que l'observateur occupe, tourne de droite à gauche. Eh bien, si la théorie de l'émission est vraie, si la lumière est une matière lancée, émise, le point le plus élevé paraîtra à gauche du point inférieur ; il paraîtra à la droite si la lumière résulte des vibrations du fluide éthéré.

Au lieu de deux seuls points rayonnants isolés, concevons qu'on présente instantanément au miroir une ligne lumineuse verticale. L'image de la partie supérieure de cette ligne se formera par des rayons qui auront, nous le supposerons, traversé l'eau ; l'image de la partie inférieure résultera de rayons dont toute la course se sera opérée dans l'air. Sur le miroir tournant, l'image de la ligne unique paraîtra brisée ; elle se composera de deux lignes lumineuses verticales, de deux lignes qui ne seront pas le prolongement l'une de l'autre.

L'image supérieure est-elle moins avancée que celle d'en bas,

paraît-elle à sa gauche, la lumière est une substance émise : le contraire a-t-il lieu, l'image supérieure se montre-t-elle à droite, la lumière est une ondulation.

117. Après cet exposé théorique si lucidement présenté, il restait à prouver que malgré la prodigieuse rapidité de la lumière, que malgré une vitesse de près de 80000 lieues par seconde, que malgré la petite longueur que l'on sera forcé de donner aux tubes remplis de liquide, que malgré les vitesses de rotation bornées qu'auront les miroirs, les déviations relatives des deux images dont on a démontré l'existence deviendront perceptibles avec nos instruments. Or, 1° il est démontré avant tout par les expériences de M. Wheatstone et par les essais déjà si avancés de M. Breguet, qu'on peut faire faire facilement au miroir mille tours par seconde. En plaçant ce premier appareil sur un tourillon doué lui-même d'une vitesse de mille tours, en superposant deux, trois axes semblables, on obtiendra des vitesses de deux, trois, quatre mille tours, par seconde, sans que les vitesses relatives des pièces en contact surpassent celle de mille tours. Du reste, rien n'empêcherait, pour rendre les déviations plus sensibles et suppléer au défaut de vitesse d'un premier miroir, d'en employer plusieurs. Si la déviation angulaire due au premier miroir est égale à α, cette déviation sera évidemment doublée par le second miroir, triplée par le troisième, etc. On pourra donc, à l'aide d'un nombre suffisant de miroirs, la rendre aussi grande que l'on voudra. 2° Il est certain que les images des points rayonnants seront visibles, quoique la durée de leur apparition doive être à peine d'un millième de seconde. M. Wheatstone a vu distinctement les images d'étincelles électriques reflétées par un miroir tournant et qui n'avaient pas une plus grande durée. M. Arago pourrait n'opérer qu'avec des lumières électriques ; car il a prouvé, il y a un grand nombre d'années, que les rayons de toute origine, ceux du soleil et d'un vert luisant, les rayons d'une étoile et du bois pourri, etc., etc., se réfractent exactement de la même manière, et doivent dès lors avoir des vitesses égales. 3° L'épaisseur du liquide que l'un des rayons devra traverser ne le rendra pas invisible, ne l'éteindra pas, car M. Bouguer a vu que la lumière d'un faible flambeau conservait plus du tiers de son intensité primitive après avoir traversé deux plaques de verre et un tube de dix pieds de long rempli d'eau. Dans la zone torride, on

voit quelquefois le fond de la mer, quand il est de sable blanc, jusqu'à des profondeurs de 100 à 120 pieds. 4° Un calcul facile prouve que deux rayons qui tomberont perpendiculairement sur un miroir faisant mille tours, formeront entre eux un angle d'une minute de degré, si l'un d'eux est arrivé au miroir $\frac{1}{43200000}$ de seconde plus tôt que l'autre, ou, ce qui revient au même eu égard à la vitesse de la lumière, si l'un des rayons précède l'autre de 7 mètres.

Cela posé, le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction, pour le passage de la lumière de l'air dans l'eau est égal à $\frac{1535}{1000}$, ou sensiblement à 4/3, d'où il résulte que le rapport de la vitesse de la lumière dans l'eau à sa vitesse dans l'air est égal au rapport de 4 à 3 dans le système de l'émission, de 3 à 4 dans le système de l'ondulation. Les espaces parcourus étant directement comme les vitesses, les différences $1 - 3/4 = 1/4$ ou $4/3 - 1 = 1/3$, seront les différences des chemins parcourus par les deux rayons avant leur arrivée au miroir; et comme il faut, pour obtenir une déviation d'une minute, que ces différences soient de 7 mètres, le tube d'eau dans le système de l'émission devra avoir 28 mètres, 21 dans le système des ondulations. Avec deux miroirs, cette longueur ne serait plus que 14 mètres; elle serait de 7 mètres avec quatre miroirs, et à travers ces 7 mètres d'eau la lumière serait encore certainement visible.

En se contentant d'une déviation d'une demi-minute, que l'on appréciera facilement avec une lunette, on réduirait le tube à 14 mètres avec un miroir, à 3,5 avec quatre, ou un miroir à quatre mille tours. Si, au lieu d'eau, on employait du carbure de soufre, et si l'on se contentait d'une déviation d'un quart de minute, on pourrait avec quatre miroirs réduire le tube à 1 mètre.

Si la lumiere employée est de la lumière blanche, les rayons de diverses couleurs dont elle se compose seront inégalement déviés, ils fourniront un spectre, mais l'ordre des couleurs sera renversé dans les deux systèmes; et pour décider si la lumière est une substance ou une onde, on n'aura qu'à examiner dans quel sens le spectre se trouve posé, si l'extrémité rouge est à droite ou à gauche.

Remarquons enfin que si l'on a recours à des étincelles électriques ou à des lumières successivement cachées et découvertes à

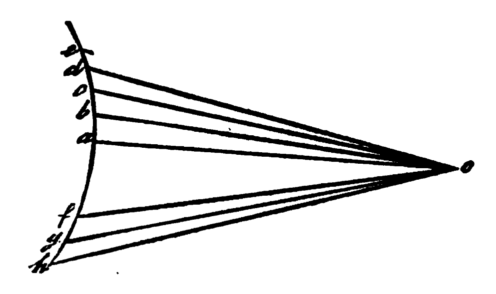
l'aide d'écrans rotatifs, leurs apparitions après la réflexion ne seront que fortuites, parce qu'on ne pourra régler leur émission à des millièmes de seconde près; mais avec le concours de plusieurs observateurs placés dans des positions différentes et armés chacun de sa lunette, on ne pourra manquer d'avoir des apparitions nombreuses et diverses des rayons réfléchis.

118. Le 4 avril 1842, M. Arago a présenté à l'Académie un appareil très ingénieux construit par M. Breguet fils, et dans lequel un miroir rotatif faisait plus de deux mille tours par seconde sous l'action d'une force très modérée. Les engrenages, les tourillons résistent parfaitement malgré cette excessive vitesse; aucun glissement n'est possible, et le nombre de tours du miroir peut en conséquence être déterminé sans aucune incertitude. Le 14 septembre 1843, le même instrument perfectionné, armé de trois miroirs, a été de nouveau soumis à l'Académie; il ne reste plus qu'à faire l'expérience décisive entre les deux théories. Nous l'attendons sans grande impatience, parce que cette démonstration, qu'on peut appeler mathématique, n'ajoutera rien pour nous à la preuve définitive qui résulte du déplacement des franges par l'interposition sur le passage d'un des rayons d'une lame plus dense.

119. Après cette digression, qui n'est pas sans quelque intérêt, revenons au phénomène qui nous occupe et à ses diverses applications. Le grand principe des interférences de la lumière nous fournit les moyens de répondre victorieusement à la seule objection raisonnable que l'on ait pu opposer à la théorie des ondulations, en rendant complétement raison du fait singulier au premier abord de la propagation rectiligne de la lumière. On affirmait, comme nous l'avons déjà vu, que si la lumière résulte des ondulations d'un fluide élastique, elle doit se propager dans toutes les directions autour du centre de vibration, de manière à tourner tous les obstacles sans jamais donner naissance à des ombres.

A cette objection formidable nous répondons simplement : 1° que la lumière se propage en réalité dans toutes les directions; 2° qu'elle tourne tous les obstacles; 3° que néanmoins les ombres existent nécessairement, parce que les diverses portions de la lumière latérale se détruisent l'une l'autre par interférence, de sorte qu'il n'y a en réalité d'efficaces que les portions de l'onde propagée en ligne

droite. Pour le prouver, concevons que *abcd* représente une portion d'onde sphérique, et que *o* soit la position occupée par l'œil; puis



supposons que les parties *ab*, *bc*, *cd*, soient mesurées de telle sorte que les différences des distances de leurs extrémités au point *o* soient précisément égales à une demi-longueur d'ondulation. Dès lors, si on considère les extrémités *b*, *c*, *d*, *a*, comme de nouveaux centres de vibrations, les ondes qu'ils produisent sont à leur arrivée à l'œil en pleine opposition ou discordance, de telle sorte qu'elles se détruiraient en interférant si leurs intensités étaient égales. Or il est aisé de voir que cette dernière condition est sensiblement remplie pour les portions *fg*, *gh*,... suffisamment distantes du point milieu *a*. Car l'amplitude des ondes envoyées à un même point *o* de l'espace par ces différentes portions dépend et de leur étendue et de l'angle que la droite qui les unit au point *o* fait avec la surface de l'onde. Or 1° il est vrai que ces portions vont continuellement en diminuant, ou que l'on a $ba > bc > cd$;... mais qu'en même temps la différence entre deux parties consécutives va en diminuant, parce qu'elles approchent de plus en plus de l'égalité à mesure que l'on s'éloigne du point *a*. La même chose a lieu pour l'obliquité ou l'angle que la droite, menée des points *a*, *b*, *c*, *d*,... au point *o*, fait avec le front de l'onde. Donc les amplitudes des ondes déterminées par les portions éloignées du point *o* tendent réellement à devenir égales; donc ces ondes interfèrent, et l'effet produit sur l'œil est dû presque uniquement aux portions de la grande onde très voisines de la ligne qui joint le point *a* au point *o*. Parmi les portions voisines, la portion *ab* est celle qui produit le plus grand effet, puisqu'elle est à la fois la plus grande et la moins oblique; cependant les portions adjacentes produisent

un effet réel aussi. En traitant bientôt de la diffraction, nous aurons à prouver que l'ombre n'est jamais absolue; qu'elle est en partie éclairée là où, suivant l'hypothèse insoutenable de l'émission, devrait régner la plus complète obscurité. En attendant, contentons-nous de signaler une conséquence remarquable de l'explication que nous venons de donner. Si l'on couvrait les portions alternées de l'onde *bc*, *de*,... dont l'effet est négatif, l'effet total d'illumination au point *o* serait augmenté, de telle sorte qu'il est vrai de dire qu'en interceptant une portion de l'onde éclairante, on lui fait réellement donner plus de lumière. Nous verrons plus tard que cette singulière conclusion est tout-à-fait vérifiée par l'expérience.

120. Jusqu'ici, en parlant d'interférences, nous avons supposé que les rayons mis en expérience étaient des rayons de lumière ordinaire ou non polarisée, et il importait de savoir ce qui arriverait si les rayons étaient polarisés. Ce sujet a été pour MM. Arago et Fresnel l'objet d'études aussi ingénieuses que fécondes. A l'aide d'expériences irrécusables, il sont arrivés aux lois suivantes : 1° deux rayons polarisés dans le même plan agissent l'un sur l'autre, ou interfèrent de la même manière que deux rayons à l'état naturel, de sorte que les phénomènes sont absolument les mêmes pour les deux espèces de lumière; 2° deux rayons dont les plans de polarisation font entre eux un angle aigu, interfèrent seulement en partie; l'intensité des franges est considérablement diminuée; 3° deux rayons polarisés dans des plans opposés ou à angle droit n'interfèrent pas; ils n'ont pas d'action mutuelle appréciable dans les cas où des rayons de lumière ordinaire se détruiraient en interférant.

Pour prouver expérimentalement ces lois, il suffit de prendre une plaque de tourmaline très homogène, dont l'épaisseur soit la même en tous ses points, de la couper en deux, et de placer une moitié sur la route de chacun des deux rayons qui doivent interférer. On voit alors immédiatement que les franges dépendent de la position relative des axes de la tourmaline. Si ces axes sont parallèles, si par conséquent les rayons sont polarisés dans le même plan, les franges seront nettement définies; elles perdent de leur intensité si les axes des tourmalines font entre eux un certain angle; elles disparaissent tout-à-fait si ces axes sont placés à angle

droit. La non-interférence des rayons polarisés à angle droit est, non moins que l'interférence de deux rayons de lumière ordinaire dans des circonstances données, une conséquence évidente et rigoureuse des premiers principes de la théorie des vibrations transversales. Deux vibrations perpendiculaires ne peuvent pas plus se neutraliser ou interférer que deux forces rectangulaires ne peuvent se détruire. Deux vibrations égales, qui s'exécutent suivant la même droite, mais dans des directions opposées, se détruisent nécessairement, ou interfèrent absolument comme deux forces égales et opposées. Ces deux faits sont également inexplicables, ou plutôt également inadmissibles dans la théorie de l'émission. Avec la meilleure volonté du monde, il est impossible d'accorder un degré même infiniment petit de probabilité à l'explication que les partisans de Newton ont essayée de l'interférence des rayons ordinaires et de la non-interférence des rayons polarisés à angle droit. Il n'y a rien là qui doive nous étonner; car la seule polarisation, si facile à concevoir dans l'hypothèse des ondulations, est une qualité occulte, un mystère profond dans le système de l'émission. Aussi n'osons-nous pas même transcrire ce que les émissionnistes ont dit à ce sujet.

Pour mieux comprendre qu'il est impossible à deux rayons polarisés à angle droit d'interférer, il suffit de nous rappeler qu'il a été démontré mathématiquement que l'intensité du rayon résultant de la rencontre de deux rayons polarisés à angle droit est constante et égale à la somme des intensités des rayons composants, quelle que soit d'ailleurs la phase sous laquelle ils se rencontrent. Le caractère seul de la nature du rayon résultant et non son intensité varie avec le rapport des phases des rayons composants. Comme nous l'avons déjà vu, le rayon résultant sera polarisé rectilignement, si les phases des rayons composants diffèrent d'un nombre exact de demi-ondulations. Dans les autres cas il sera polarisé elliptiquement; ou circulairement, si, les vibrations composantes étant égales, leurs phases diffèrent d'un multiple impair du quart d'une ondulation. L'expérience, ainsi que nous l'avons vu, confirme pleinement les conséquences de la théorie.

121. Fresnel et M. Arago ont découvert plus tard trois nouvelles lois, qu'on peut énoncer comme il suit : 1° deux rayons polarisés dans

des plans opposés, ou à angle droit, peuvent être ramenés dans le même plan de polarisation sans acquérir pour cela la faculté d'interférer ensemble. 5° Deux rayons polarisés dans des plans opposés et ramenés ensuite au même plan de polarisation interfèrent comme de la lumière ordinaire, pourvu qu'ils appartiennent à un faisceau polarisé primitivement en entier dans un seul plan. 6° Dans les phénomènes relatifs à l'interférence des rayons qui ont subi la double réfraction, le lieu des franges n'est pas déterminé uniquement par la différence des routes ou des vitesses; il faut dans certaines circonstances tenir compte d'une demi-ondulation qui a été comme perdue.

Cette perte d'une demi-ondulation est une belle et simple conséquence de la théorie des vibrations transversales. En effet, la vibration de l'onde est divisée dans l'intérieur du cristal en deux autres perpendiculaires entre elles, et situées l'une dans le plan de la section principale, l'autre normale à ce plan. Chacune de ces vibrations devra être de nouveau décomposée en deux autres suivant des directions rectangulaires, et l'on conclut facilement du mode de décomposition que des quatre composantes provenant des vibrations primitives, deux, sur une des directions définitives, conspirent ou s'accordent, tandis que les deux autres, sur la direction perpendiculaire, sont opposées. Si donc on regarde les vibrations de l'un des couples comme coïncidentes, il faudra que les vibrations de l'autre couple soient regardées comme différant d'une demi-ondulation.

122. Pour donner plus d'intérêt à ce que nous venons de dire du phénomène si remarquable, si étonnant de l'interférence, disons un mot du parti que M. Arago a tiré de ces données de la théorie et de l'expérience pour résoudre dans ces derniers temps diverses questions très délicates de physique, et construire de nouveaux instruments de météorologie plus puissants et plus précis.

Comme nous l'avons vu, si deux faisceaux de lumière blanche sortis d'une source commune se sont propagés dans un même milieu homogène et ont parcouru des chemins à peu près égaux, ils forment partout où ils se croisent sous de petits angles un système composé de quelques franges obscures et brillantes parfaitement visibles. La frange centrale est la moins irisée de toutes, et ce carac-

tère suffit pour la faire reconnaître. Dans la place qu'elle occupe, les rayons interférents ont parcouru des chemins exactement égaux. Tout est pareil de forme, d'intensité et de coloration de part et d'autre de cette frange centrale.

Comme nous l'avons dit encore, M. Arago reconnut, il y a déjà bien des années, que les conditions des chemins parcourus ne déterminent pas seules la place des franges formées ainsi à l'aide de l'interférence de deux faisceaux du lumière. En plaçant dans l'air une lame de verre excessivement mince sur le trajet d'un des faisceaux, il vit les bandes marcher du côté de la lame. Cette expérience, répétée un grand nombre de fois avec toute sorte de milieux solides, liquides, gazeux, conduisit à une loi qui lie d'une manière très simple le déplacement que les franges éprouvent à la puissance réfringente et à l'épaisseur du corps diaphane, qui est traversé ainsi par un seul des deux faisceaux.

123. Dès qu'il eut découvert ce moyen, entièrement nouveau, de mesurer la puissance réfractive des corps diaphanes, M. Arago dut songer à l'appliquer à l'étude de cette puissance dans l'air humide. Il y avait, en effet, un grand intérêt à savoir définitivement si l'hygromètre devait figurer dans le calcul des réfractions astronomiques. C'est une question déjà traitée par deux illustres physiciens : d'abord par Laplace, à l'aide de la supposition générale que les vapeurs et les liquides dont elles proviennent ont le même pouvoir réfringent, supposition très plausible dans le système de l'émission, mais que des recherches postérieures n'ont pas confirmée; ensuite par M. Biot, d'après des expériences tout aussi exactes que la méthode employée pouvait le comporter. Fresnel voulut bien se joindre à M. Arago pour exécuter l'expérience que celui-ci avait projetée. Voici comment on la réalisa :

Deux tubes en cuivre mince, d'environ un mètre de long, furent soudés l'un à l'autre comme les deux canons d'un fusil à deux coups. A chaque extrémité, ces deux tubes étaient fermés par une seule et même plaque de verre à faces parallèles. Des robinets donnaient passage aux substances dont on voulait étudier les effets.

Quand les deux tubes renfermaient de l'air de la même densité, de la même température et du même degré d'humidité, le faisceau qui traversait le tube de droite produisait, en se mêlant à sa sortie

au faisceau provenant du tube de gauche, des franges irisées dont la place coïncidait presque exactement avec celle des franges qui résultaient de l'action de ces mêmes faisceaux se propageant à l'air libre.

Si, la force élastique étant toujours égale dans les deux tubes, l'un renfermait du chlorure de calcium et l'autre de l'eau; si, dès lors, le premier tube était rempli d'air complétement sec, et le second d'air saturé d'humidité, les bandes formées par l'interférence du faisceau, qui dans sa course traversait un mètre d'air humide, et du faisceau qui traversait un mètre d'air sec, n'occupaient plus la place des franges engendrées à l'air libre; l'interposition des tubes produisait un déplacement notable, un déplacement d'une frange et demie. Ce déplacement se faisait toujours du côté de l'air sec.

Le sens du déplacement des franges prouvait d'abord, d'une manière incontestable, que l'*air* sec avait plus de puissance réfringente que l'air *humide*. Restait à assigner la différence.

De la loi dont il a été question plus haut, ou bien d'expériences faites sur l'affaissement de pression que l'air devait subir dans l'un des tubes, pour que les franges se déplaçassent d'une frange et demie du côté opposé, on concluait directement la différence des pouvoirs réfractifs des deux airs; mais il était possible qu'une légère couche d'humidité se fût précipitée à la surface intérieure des deux verres, dans les portions correspondantes au tube à air humide. Or une pareille couche, quelque mince qu'on la supposât, jouerait dans le phénomène un rôle important; elle masquerait la plus grande partie de l'effet cherché. Telle est la difficulté qui détourna Fresnel de donner aucun chiffre à l'appui de la conclusion que M. Arago et lui tirèrent de leur expérience commune.

Cette difficulté, M. Arago l'a depuis complétement levée, en répétant l'ancienne expérience à l'aide de deux autres tubes, l'un sec et l'autre humide, fermés à leurs deux extrémités par les deux mêmes verres dont on s'était d'abord servi; mais cette fois les tubes, au lieu d'un mètre, n'avaient plus qu'un centimètre de long. L'influence de la différence de puissance réfringente des deux airs se trouvant ainsi à peu près éliminée, il ne devait plus guère rester que l'effet de la couche d'humidité précipitée à la surface intérieure des deux plaques de verre du côté du tube humide; cet effet fut

constamment inappréciable. Le mouvement d'une frange et demie, observé avec les tubes d'un mètre de long, dépendait donc exclusivement des propriétés réfringentes comparatives de l'air sec et de l'air saturé d'humidité. La différence était telle à + 27° centigr., que si, pour l'air sec, on prenait comme rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction, pour le passage de la lumière du vide dans l'air, le nombre

1,0002945.

Ce rapport devenait pour le passage du vide dans l'air humide :

1,0002936.

Chose singulière! une différence sur la septième décimale des indices de réfraction se trouva ainsi constatée à l'aide d'expériences dans lesquelles aucun rayon ne s'était réfracté. Ajoutons que l'exactitude de la méthode étant proportionnelle à la longueur des tubes employés, rien n'aurait empêché d'aller encore beaucoup plus loin.

Cette expérience aura un complément dont M. Arago s'occupe. Il s'agit de savoir si la chaleur exerce sur la réfraction de l'air une influence qui puisse, qui doive être distinguée de sa propriété dilatante. Le doute mérite d'autant plus d'être levé que le verre chaud réfracte plus que le verre froid.

Il faudra encore, pour ne rien laisser dans le vague sur la question si importante et si délicate des réfractions astronomiques, étudier l'influence de l'électricité en repos et de l'électricité en mouvement. Tout cela est maintenant accessible, et sera promptement éclairci.

124. Nous allons indiquer brièvement quelques autres applications dont la méthode de M. Arago est susceptible, et qu'il a exposées à l'Academie.

Concevons un seul tube d'une certaine longueur, vide d'air, bouché à ses deux extrémités par des plaques de verre, et hermétiquement fermé. En choisissant convenablement ces deux premières plaques de verre, et une troisième plaque mobile destinée a être placée à côté du tube sur la route du faisceau extérieur, on peut faire en sorte que, par un effet de compensation, des franges se forment par l'interférence des rayons propagés à travers le vide

et de ceux qui ont traversé l'air extérieur, tout comme si les uns et les autres s'étaient mus dans un milieu homogène : seulement, si l'atmosphère extérieure change de puissance réfractive, les franges se déplaceront ; leur mouvement se fera vers le tube vide quand le pouvoir réfractif diminuera, et en sens inverse quand le pouvoir réfractif augmentera. Un pareil instrument pourrait donc dans les observatoires être employé, au lieu du baromètre et du thermomètre, à la détermination de la force réfractive de l'atmosphère. L'observation s'exécuterait à la hauteur de l'objectif de l'instrument astronomique, et ainsi finiraient d'interminables disputes sur la convenance de faire usage, dans le calcul des réfractions, du thermomètre extérieur ou du thermomètre intérieur.

La réfraction de l'air est fonction de sa pression et de sa température. La pression restant constante, si la température varie d'un seul degré centigrade, les franges, dans un instrument de 11 décimètres de long, se déplacent de plus de deux franges entières. Ce mouvement, on le mesure à la précision d'un dixième de frange. L'instrument dont il vient d'être question, combiné avec le baromètre, peut donc servir à déterminer la température de l'air à 1/20 de degré près.

Cette extrême sensibilité pourrait être accrue indéfiniment en augmentant la longueur du tube vide, et cependant c'est là un des moindres avantages de la méthode. Un thermomètre étant influencé par le rayonnement du ciel, par le rayonnement du sol, par le rayonnement de tous les autres objets qui l'entourent, ne donne jamais la température de l'air. Au contraire, le résultat déduit d'une propriété de l'atmosphère, fonction de sa température, est complétement à l'abri de toutes ces causes d'erreur.

Dans les voyages, si l'on voulait se contenter des températures atmosphériques, telles qu'on les détermine aujourd'hui avec le thermomètre, le tube vide pourrait servir de baromètre. Une longueur de tube d'un mètre permettrait d'apprécier des variations de pression d'un à deux dixièmes de millimètre. Un baromètre sans liquide sembleroit assurément une chose assez curieuse ; mais les voyageurs remarqueraient surtout son peu de fragilité.

M. Arago a montré que sa méthode pour déterminer les réfractions pourra servir à saisir l'état des atmosphères à toutes les dis-

tances des corps échauffés ou non échauffés ; à poursuivre les intéressantes expériences de M. Faraday sur les atmosphères limitées du mercure et sur leur diminution de densité, à mesure qu'on s'éloigne de ce liquide ; peut-être même à rendre sensible, avec des tubes suffisamment longs, l'influence des odeurs.

L'instantanéité de l'observation permet encore de concevoir l'espérance qu'en orientant le tube vide d'une manière convenable par rapport à un fort centre d'ébranlement, on rendra sensible à l'œil plusieurs propriétés des ondes sonores.

Quant aux liquides, il résulte d'expériences déjà faites que par l'observation des franges on peut saisir, même près du maximum de densité, les changements de réfraction de l'eau correspondants à 1/40 de degré centigrade. Qui ne voit là un moyen nouveau, et d'une précision extrême, d'étudier la propagation de la chaleur dans cette nature de corps, sans qu'il faille désormais briser leur continuité en introduisant dans la masse la boule et la tige du thermomètre? La même remarque s'applique à l'étude de la propagation de la chaleur à travers les corps solides diaphanes.

Il n'est, enfin, jusqu'aux augmentations du pouvoir réfractif de l'eau et du verre, résultant de la compressibilité de ces substances, qui ne puissent être aperçues à l'aide des nouveaux instruments. Avec un tube d'un mètre de long, la compressibilité de l'eau sera visible pour chaque deux-centièmes d'atmosphère. Sur un tube de verre de même longueur, 1/10 d'atmosphère deviendra sensible.

Le baromètre, thermomètre, ou réfracteur optique, a déjà toute la commodité désirable, quand il doit être employé dans une chambre obscure. Comme instrument de voyage, il serait susceptible d'une grande amélioration, si l'on était parvenu à résoudre un problème difficile, dont d'illustres physiciens, MM. Arago et Babinet, n'ont pas encore trouvé la solution. Il s'agirait d'amener, sans de trop longs tâtonnements, à des conditions d'interférences utiles deux rayons lumineux, qui, avant d'atteindre la loupe au foyer de laquelle les franges se forment, ont été séparés les uns des autres de plusieurs centimètres. Il y a là comme un mystère à approfondir, comme un secret difficile à trouver. Nous croyons avoir dit au sujet des interférences tout ce qu'il y a de vraiment utile.

125. Disons cependant encore en terminant que la théorie des interférences, fécondée par le génie de M. Arago, a donné la seule explication admissible d'un phénomène bien remarquable, la scintillation des étoiles. Considéré dans sa nature, ce phénomène, trop souvent mal défini, n'est autre chose qu'un changement apparent d'intensité et de couleur, très fréquent, très rapide, qui a sa cause dans notre atmosphère. Aristote, Galilée, Scaliger, Képler, Descartes, Hook, Huygens, Newton, Mitchel, et presque tous les astronomes modernes, avaient essayé, mais sans succès, d'expliquer ces variations mystérieuses de couleur et d'éclat. M. Arago, dans un mémoire actuellement sous presse, a démontré sans peine qu'aucune de ces explications n'était soutenable. Plus prudents, des observateurs habiles, et parmi eux Melville, Nicholson, Forster, Thomas Young, ont déclaré avec franchise que la scintillation leur semblait inexplicable. Après de longues recherches, de nombreuses expériences, une étude approfondie de celle des lois des interférences dues à la différence des chemins parcourus par les rayons lumineux, ou à l'inégale réfringence des milieux que ces mêmes rayons ont traversés, M. Arago est arrivé à cette conclusion non moins certaine en fait qu'en théorie. Les rayons partant d'une étoile qui, après avoir traversé une atmosphère où il existe des couches inégalement chaudes, inégalement denses, inégalement humides, vont se réunir au foyer d'une lentille, doivent y former des images d'intensité et de couleur perpétuellement changeantes, c'est-à-dire des images telles que la scintillation nous les présente. La scintillation se rattache ainsi naturellement aux interférences lumineuses, et nous avons désormais une explication plausible de ce phénomène mystérieux. M. Arago, dans la dernière section de son mémoire, a réuni et expliqué des observations variées sur la scintillation des étoiles hors du foyer des lunettes, sur la scintillation du soleil réduit par sa réflexion, à la surface de miroirs très courbes, à ne soustendre qu'un très petit angle. L'ensemble de ces faits donne à la nouvelle théorie tous les caractères d'une véritable démonstration.

Diffraction de la lumière. 126. Nous avons déjà vu qu'il résulte de la théorie des ondulations, que l'intensité de la lumière qui rencontre un obstacle diminue très rapidement en dedans des limites de l'ombre géométrique ; il nous reste à approfondir d'autres phéno-

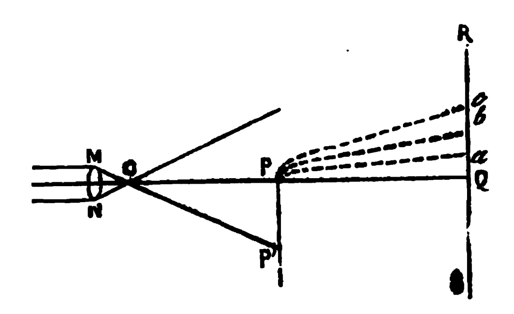
mènes auxquels cette rencontre donne naissance, à prouver que cette même théorie explique tout, jusqu'aux plus petites particularités des faits.

Pour arriver à bien comprendre la théorie des ombres, il faut avant tout rechercher ses lois dans le cas très simple où le corps lumineux est réduit à un point. Grimaldi a le premier étudié avec soin et expliqué avec quelque succès le fait si inattendu de la diffraction ou de l'inflexion de la lumière. Il remarqua que lorsqu'un petit corps opaque est placé dans le cône de lumière formé par les rayons divergents qui pénètrent dans la chambre obscure à travers un très petit trou, son ombre réelle est beaucoup plus large que l'ombre géométrique; de sorte que la lumière, en rasant le corps opaque, subit une vraie déviation et cesse de se mouvoir en ligne droite. En observant l'ombre réelle avec plus d'attention, il vit 1° qu'elle était terminée par trois franges colorées; 2° que la largeur et l'intensité de ces franges sont plus petites pour celles qui sont plus éloignées de l'ombre; 3° que les distances qui les séparent des limites de l'ombre géométrique, ou les unes des autres, restent invariables dans toute leur étendue, excepté là où le corps opaque présente un angle saillant ou un angle rentrant; car si l'angle est saillant, les franges s'arrondissent alentour; s'il est rentrant, elles se croisent et viennent toucher l'ombre de chaque côté, sans interférer ou se confondre. Grimaldi, dans certaines circonstances favorables, observa de semblables franges à l'intérieur de l'ombre géométrique d'écrans très étroits. Hooke et Newton étudièrent la diffraction sans en donner aucune explication raisonnable, sans découvrir sa véritable cause. Young et Fresnel ont amené ce phénomène rebelle à devenir une preuve si certaine de la théorie des ondulations, qu'aucun esprit impartial ne pourra désormais se refuser à l'évidence.

127. Suivant notre méthode, exposons les faits; nous examinerons ensuite ce qu'il faudra en conclure pour la vérité des deux théories rivales. Et d'abord voyons quelles modifications subit la lumière quand elle vient raser les bords d'un obstacle de nature quelconque.

I. Supposons qu'un rayon de lumière homogène pénétrant dans une chambre obscure tombe sur une lentille MN de court foyer, arrive au foyer O, et diverge ou s'épanouisse en un cône lumineux; puis plaçons dans l'intérieur de ce cône un petit obstacle PP', dont

nous recevrons l'ombre sur un écran de papier blanc ou de verre dépoli : nous observerons alors les particularités suivantes :



1° La ligne OPQ, limite de l'ombre géométrique, n'est pas la ligne actuelle de séparation de la lumière et de l'ombre, ou la limite de l'ombre réelle.

2° L'espace QS situé au-dessous de cette ligne n'est pas complétement obscur; il est éclairé par une lumière très déliée, qui pénètre jusqu'à une certaine profondeur dans l'ombre géométrique, et s'éteint graduellement à mesure qu'elle s'éloigne du bord Q de cette ombre.

3° De l'autre côté des limites de l'ombre géométrique vers QR, l'écran est éclairé par des rayons divergents, et sillonné par des séries de bandes alternativement claires ou obscures, toutes parallèles aux limites de l'ombre. La distance qui sépare les franges de cette limite, ou les unes des autres, varie avec la position de l'écran, et diminue indéfiniment quand l'écran est tout-à-fait rapproché de l'obstacle. Mais une même frange est partout à la même distance des limites de l'ombre géométrique, et par conséquent des autres franges, excepté dans le cas particulier que nous avons dit. Les franges sont d'ailleurs d'autant plus visibles qu'elles sont plus voisines de l'ombre; à une certaine distance elles sont tellement faibles qu'on ne les voit plus.

4° Les franges varient avec la couleur de la lumière ; elles ont leur maximum de largeur avec la lumière rouge, leur minimum avec des rayons violets, une largeur moyenne avec des rayons de moyenne réfrangibilité. Avec la lumière blanche ou composée, les franges de diverses couleurs ne sont pas dès lors parfaitement su-

perposées : aussi aperçoit-on une suite de franges colorées qui se succèdent dans l'ordre des couleurs du spectre.

Si le centre lumineux n'est plus réduit à un point, s'il a des dimensions appréciables, les franges provenant de chacun des points lumineux empiètent les unes sur les autres, leurs couleurs s'altèrent, et de leur ensemble plus obscur résulte ce que l'on appelle la pénombre de l'objet.

128. Si l'on suit la marche des franges à partir de leur origine ou point de départ, on voit qu'elles se propagent suivant des lignes courbes, dont la concavité est tournée du côté de l'ombre. Pour mesurer avec plus d'exactitude leur distance à la limite de l'ombre, Fresnel eut l'heureuse idée de les observer directement avec une loupe munie d'un micromètre : avant lui, on mesurait les distances sur l'écran, que l'on approchait ou que l'on éloignait à volonté. De ces mesures précises il résulta que la courbe, lieu géométrique des points successivement occupés par chaque frange, est une hyperbole qui a pour sommet le bord de l'obstacle, et qui a pour centre le point milieu de la droite qui unit ce même bord au centre lumineux. On peut, sans erreur sensible, au moins à une certaine distance du bord, remplacer ces hyperboles par leurs asymptotes; et si alors on mesure les angles qu'elles font entre elles, on verra que ces angles croissent rapidement à mesure que la distance de l'obstacle au point lumineux diminue. Si cette distance surpasse un mètre, les franges sont très serrées; avec la lumière rouge, les franges de premier ou de second ordre font entre elles un angle d'au moins deux minutes; cet angle dépasse cinq minutes à la distance d'un décimètre, seize minutes à la distance d'un centimètre : les franges se dilatent donc à mesure que le bord de l'obstacle approche du point lumineux.

129. II. Plaçons dans un cône divergent, parti d'un point lumineux, un fil très fin de fer, et recevons son ombre sur un écran ou sur un verre dépoli. On observera en dehors de l'ombre géométrique une série de bandes parallèles ou franges analogues à celles produites dans l'expérience précédente par le simple bord de l'obstacle. Mais on verra de plus que l'espace entier de l'ombre géométrique est occupé par des stries parallèles alternativement brillantes et obscures : ce sont les franges intérieures, plus serrées en général et moins tranchées. Si la largeur de l'obstacle devient plus grande, les franges

intérieures disparaissent. Elles se propagent comme les franges extérieures, suivant des hyperboles dont la courbure est si peu sensible, qu'on peut à peine la saisir. Comme les franges extérieures, elles sont plus larges dans la lumière rouge que dans la lumière violette, et d'une largeur moyenne avec les rayons de moyenne réfrangibilité. Avec la lumière blanche, elles se succèdent colorées dans le même ordre que les rayons du spectre.

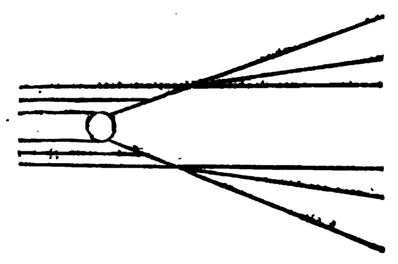
Si l'obstacle n'est pas terminé par des lignes parallèles, l'effet produit se complique. Quand l'obstacle, par exemple, est terminé par un angle, outre les franges ordinaires on observe deux nouvelles séries de stries de chaque côté de la ligne qui partage cet angle en deux parties égales. Ce fait fut encore observé par Grimaldi.

130. III. Examinons ce qui aura lieu si l'on place deux obstacles vis-à-vis l'un de l'autre, de manière à former une ouverture d'une dimension quelconque. On se sert pour cet objet d'un appareil composé de deux plaques métalliques, dont l'une est fixe, et dont l'autre se meut à l'aide d'une vis. Les bords des deux plaques, rectilignes et parallèles, forment une ouverture rectangulaire, dont la grandeur peut varier à volonté au moyen de la vis. Si maintenant on substitue une petite ouverture rectangulaire au fil de la dernière expérience, on observera un phénomène remarquable. Le rayon lumineux a considérablement divergé après son passage à travers l'ouverture, de sorte que l'espace qu'il occupe sur l'écran ou le verre dépoli dépasse de beaucoup la projection géométrique de l'ouverture. De plus, cet espace est entièrement recouvert de bandes parallèles ou franges alternativement brillantes et obscures, distribuées symétriquement des deux côtés de la droite, qui joint le point lumineux ou centre de l'ouverture. Les franges se propagent à partir de l'ouverture suivant des hyperboles dont la courbure et l'inclinaison mutuelle dépendent de la largeur de l'ouverture et de sa distance au point lumineux. Fraunhofer, qui a observé ce genre de phénomène avec la plus grande attention, a trouvé que, pour une couleur donnée, les angles compris entre les bandes successives et la ligne centrale forment une progression arithmétique dont la raison est égale à son premier terme; et qu'avec diverses ouvertures les distances d'une même bande à la ligne centrale sont en raison inverse de la largeur de l'ouverture. Les franges sont plus larges et plus espacées dans la

lumière rouge, plus étroites et plus serrées dans la lumière violette, moyennement larges et moyennement espacées avec les rayons moyens du spectre. Avec la lumière blanche, elles offrent la succession de couleur déjà mentionnée. Quand l'ouverture est formée de deux bords rectilignes formant entre eux un angle, Newton a remarqué que les franges n'étaient pas exactement parallèles aux bords; qu'elles devenaient plus larges à mesure que les bords s'approchent; qu'elles finissaient par se croiser en donnant naissance à deux branches hyperboliques convexes dont l'une des asymptotes est perpendiculaire à la base extrême de l'angle des bords, tandis que l'autre asymptote est parallèle à ces mêmes bords.

Il est inutile d'observer que les phénomènes de diffraction peuvent être variés à l'infini en changeant les contours des bords diffracteurs. Nous avons choisi comme plus élémentaires les exemples qui précèdent; ils suffiront surabondamment, pourvu que par des mesures précises on passe aux nombres, pour éprouver toute théorie par laquelle on voudra les expliquer; et la théorie qui aura subi cette épreuve rendra facilement compte des apparences les plus complexes. Examinons maintenant ce même ensemble de faits dans ses rapports avec les deux théories de l'émission et des ondulations.

131. Newton supposait que le rayon lumineux s'infléchissait en rasant les bords de l'obstacle sous l'influence des forces attractives et répulsives que les molécules des corps sont censées exercer sur les molécules de lumière lorsqu'elles arrivent au contact. Ainsi le rayon rasant les bords du corps opaque ou du fil de fer serait infléchi en dehors par répulsion, et comme cette force répulsive diminue rapidement quand la distance augmente, il en résulte que le rayon qui passe à distance du bord est moins infléchi que le rayon rasant. La caustique formée par les intersections successives de ces rayons infléchis sera donc concave en dedans; et comme aucun rayon ne passe dans son intérieur, elle formera les limites de l'ombre réelle. Cette supposition explique, on le voit, d'une manière satis-



faisante les contours curvilignes de l'ombre réelle et son excès sur l'ombre géométrique.

Pour expliquer les franges parallèles aux bords de l'ombre géométrique, Newton paraît avoir admis que les forces attractives et répulsives se succèdent alternativement, de sorte que les molécules lumineuses éprouvent en passant près des corps une suite d'inflexions vers l'extérieur et vers l'intérieur qui leur font parcourir une courbe sinueuse à laquelle elles finissent par échapper. Les intersections des rayons émis ainsi de différents points d'une même sinuosité forment une caustique ou frange, de sorte que les franges successives étant produites par les rayons qui passent à une distance donnée des bords de l'obstacle, sont par là même parallèles à ces bords.

Enfin, la décomposition de la lumière blanche dans ses éléments s'explique en admettant que les rayons de réfrangibilité différente sont aussi des rayons de diverse diffrangibilité; que les corps exercent à une plus grande distance sur les rayons moins réfrangibles la même action que sur les rayons plus réfrangibles à une moindre distance.

Il est inutile de faire ressortir le vague de ces apparentes explications; Newton lui-même n'en fut pas satisfait, et il ne mit pas la dernière main à ses essais sur la diffraction. Les aperçus, même les moins fondés d'un génie comparable à celui de Newton, exciteront toujours un vif et profond intérêt : aussi ne faut-il pas s'étonner de voir un bon nombre de ses admirateurs attacher à ces conjectures une importance qu'il n'y attachait pas lui-même. La théorie de Newton compte encore parmi nous des défenseurs, et nous sommes dans la nécessité de faire ressortir parmi les phénomènes de la diffraction certains faits capitaux qu'ils n'expliqueront jamais, ou plutôt qui sont en plein désaccord avec leurs hypothèses.

Si la diffraction est l'effet de forces attractives et répulsives émanant des corps placés sur le passage de la lumière, si ces forces sont d'une nature analogue à celles qui, dans la théorie de l'émission, déterminent la réflexion et la réfraction, il faudra nécessairement admettre qu'elles existent à différents degrés dans les différents corps; que par conséquent l'inflexion du rayon et par suite la largeur des franges diffractées doivent varier avec la masse, et

la nature des corps diffringents. Or, il est évidemment prouvé, au contraire, que tous ces corps, quelles que soient leur nature et leur masse, pourvu que le contour de leurs bords reste le même, produisent dans les mêmes circonstances des franges identiquement les mêmes, et qu'en réalité, l'interruption partielle de lumière causée par un obstacle de tel contour, mais de nature et de masse quelconques, est la seule condition essentielle du phénomène. Gravesende semble avoir remarqué le premier que la nature et la densité du corps n'avaient aucun effet sur la grandeur des franges; et ce fait a été confirmé de la manière la plus éclatante par les recherches exactes d'un très grand nombre de physiciens. Un des plus zélés défenseurs de la théorie de l'émission a été au moins forcé d'admettre que les forces diffringentes, si elles existent, sont indépendantes de la nature chimique des corps inflecteurs, et sont par conséquent tout-à-fait différentes de celles qui dans cette même théorie produiraient la réflexion et la réfraction.

Pour prouver que la masse, c'est-à-dire l'épaisseur plus ou moins grande de l'obstacle n'a aucune influence sur les franges, Fresnel a pris deux plaques d'acier, dont les bords étaient arrondis dans une moitié de leur longueur et aigus dans l'autre. Il plaça la portion arrondie de chaque plaque devant le bord aigu de l'autre. Alors si la position des franges dépendait de la forme de la surface, l'effet devrait être doublé, les franges devraient apparaître brisées à leur milieu. Il n'en fut rien cependant : elles étaient parfaitement droites dans toute leur longueur.

D'ailleurs les forces réfringentes, alors même qu'elles varieraient d'intensité avec la nature et la masse du corps, avec la distance de la molécule lumineuse au bord, ne peuvent réellement pas dépendre du chemin déjà parcouru par la molécule, avant qu'elle atteigne le bord; de sorte que la grandeur et la position des franges ne pourraient pas varier dans cette hypothèse avec la distance du point lumineux au corps inflecteur : or, cette conséquence inévitable de la théorie de l'émission est précisément la négation des faits, car les franges se dilatent, et forment entre elles un plus grand angle, quand l'obstacle s'approche du point lumineux.

Il est donc impossible d'admettre que la diffraction résulte de l'action des forces attractives ou répulsives exercées sur les molé-

cules lumineuses par les molécules des corps. Les mêmes objections renversent les hypothèses de Mairan et de Du Tour, qui attribuaient l'inflexion des rayons à la réfraction produite par la petite atmosphère qui accompagne le corps, ou à une différence de pouvoir réfringent dans le milieu environnant; car si une semblable atmosphère se trouvait réellement fixée par l'attraction du corps qu'elle envelopperait (et cette attraction est le seul moyen d'expliquer sa présence), sa densité, sa forme et par suite son action sur la lumière varieraient avec la densité et la forme du corps. Nous sommes donc réellement forcés de conclure que le phénomène de la diffraction est complétement inexplicable dans le système de l'émission. Voyons avec quelle élégante facilité la théorie des ondulations résout ce difficile problème.

132. Young le premier entrevit dans la diffraction une simple question d'interférence. Il attribua les franges extérieures formées en dehors de l'ombre des corps à l'interférence de deux portions de lumière, dont l'une, en passant près du corps, a été plus ou moins déviée, tandis que l'autre a été réfléchie obliquement par ces mêmes bords. Les franges intérieures, situées dans l'ombre d'un corps très mince, seraient résultées de l'interférence des rayons qui pénètrent dans l'ombre de chaque côté, après avoir été infléchis par les bords. Enfin les franges produites par une petite ouverture seraient dues à l'interférence des rayons réfléchis par les bords opposés. L'illustre physicien anglais appliqua le calcul à sa théorie, et montra que les effets assignés d'avance s'accordaient assez exactement avec les faits. Il démontra même que les franges intérieures produites dans l'ombre d'un corps mince ne pouvaient pas avoir d'autre cause que celle qu'il leur avait assignée. En effet, lorsqu'il eut placé un très petit écran opaque de l'un des côtés du corps diffracteur, de manière à intercepter la portion de lumière qui aurait été infléchie par ce bord, les franges disparurent immédiatement et quoique la lumière passant par l'autre bord n'eût été modifiée en aucune manière.

La loi générale des franges, la liaison qui existe entre leur grandeur, la longueur d'une onde, la distance de l'écran au centre lumineux, sont complétement expliquées dans cette hypothèse. Il est

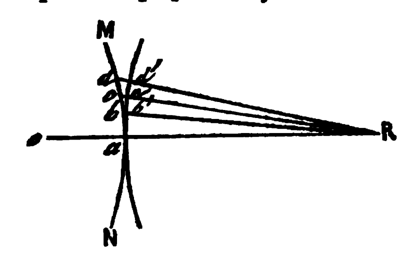
facile d'en déduire que la marche des franges n'est pas rectiligne, mais curviligne et hyperbolique, et que l'inclinaison des branches d'hyperboles, confondues sensiblement avec leurs asymptotes, augmente à mesure que les franges se dilatent.

133. Fresnel adopta d'abord, et développa l'hypothèse de Young; mais plus tard, il n'en fut plus satisfait, et la rejeta avec raison. Il avait démontré qu'il existe, quant aux lieux des franges, une différence légère, mais sensible et trop appréciable entre les résultats du calcul et ceux de l'observation. Il est d'ailleurs très difficile de concevoir dans cette hypothèse comment les franges ne dépendent aucunement de la forme des bords, surtout lorsqu'ils sont très tranchants. La petite quantité de lumière dont on peut dans ce dernier cas admettre à la rigueur la réflexion, serait insuffisante pour interférer avec celle qui passe à côté du corps, de manière à former des franges si brillantes. On ne concevrait pas que le dos et le tranchant d'un rasoir puissent donner des franges parfaitement identiques. Enfin, on ne pourrait jamais expliquer certains phénomènes de diffraction, si l'on n'admettait que les rayons qui rasent le corps ne concourent pas seuls à la production des franges, mais qu'elles sont dues en partie à la lumière qui passe à une certaine distance de ces mêmes bords, et qui est elle-même déviée.

Fresnel se trouva donc dans l'heureuse nécessité de chercher un fondement plus solide à la théorie de la diffraction. Ses recherches sont consignées dans un admirable mémoire couronné en 1819 par l'Académie royale des sciences. Au point de vue où il s'est placé, les phénomènes de la diffraction seraient uniquement dus à l'interférence des ondes partielles ou secondaires, qui sont comme séparées de l'onde principale par l'interposition de l'obstacle. Dans l'application de ces principes, il suppose que la surface de l'onde, au moment où elle atteint l'obstacle, est subdivisée en un nombre indéfini de parties égales; une fois cette décomposition admise, on déduit immédiatement des lois mathématiques des interférences l'action résultante de ces ondes partielles sur un point quelconque de l'espace. Fresnel a montré que cette résultante, dont le carré mesure l'intensité de la lumière, est exprimée par deux intégrales définies dont les limites sont déterminées par la nature de chaque problème, et qui présentent plusieurs maxima et plusieurs minima,

correspondant précisément aux franges brillantes et obscures. Le problème de la diffraction était résolu ; ses lois se trouvaient déduites des deux mêmes principes à l'aide desquels nous avons expliqué la réflexion et la réfraction ; le principe des interférences, et le principe d'Huygens. Il ne restait plus qu'à appliquer cette solution générale à divers cas particuliers pour comparer les résultats du calcul aux données de l'expérience. Les cas de diffraction choisis par Fresnel sont ceux dont nous avons déjà étudié les lois, c'est-à-dire les phénomènes dus à l'action 1° d'un simple bord rectiligne : 2° d'une ouverture terminée par deux bords rectilignes ; 3° d'un petit corps opaque limité de la même manière L'accord de la théorie et de l'observation fut vraiment surprenant. Les positions calculées des diverses bandes différaient rarement de plus d'un centième de millimètre des positions observées.

134. Les circonstances générales de ces divers phénomènes peuvent se déduire des principes que nous venons de rappeler à l'aide de considérations d'une simplicité extrême, quoique l'exposition entière et rigoureuse de la théorie exige les ressources de l'analyse la plus compliquée. Voyons d'abord quel est en général l'effet de l'obstacle. Supposons que *o* soit l'origine d'une onde lumineuse divergente M*a*N et qu'on veuille estimer l'effet de lumière produit au point R. De ce point, comme centre, décrivons un cercle qui touche en *a* l'onde circulaire M*a*N, et menons les lignes R*b′ b*, R*c′ c*,.... de telle sorte que les portions interceptées *b b′*, *c c′*, *d d′*,... soient respectivement égales à une, deux, trois... longueurs d'onde. L'effet produit au point R, d'après le principe d'Huygens, sera la somme des effets produits séparément par chaque portion *ab*, *bc*, *cd*,... Mais puisque les distances de ces portions consécutives au point R diffèrent d'une demi-ondulation, leurs effets en ce point seront opposés ; et si l'on désigne par *i*, *i′*, *i″*.... les intensités de la lumière produite en R par l'action de portions successives *ab*, *bc*, *cd*,... par 1 la lumière totale produite par la demi-onde indéfinie *a*N ou *a*M, la lumière réelle au point R sera :



$$1,\ 1+i,\ 1+i-i',\ 1+i-i'+i''....$$

suivant que l'obstacle sera placé aux points a, b, c..... Si l'obstacle est entièrement retiré, l'intensité de la lumière sera exprimée d'une part par la somme $1+1$, de l'autre par la série

$$1+i-i'+i''-i'''....$$

et l'on aura :

$$1+i-i'+i''-i'''+....=2.$$

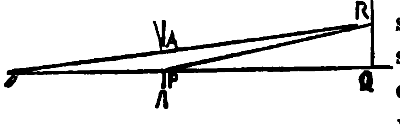
Comme les termes de la série vont toujours en diminuant et sont alternativement positifs ou négatifs, il est évident que si l'on s'arrête à un certain terme, le signe du reste sera le même que le signe de son premier terme, de sorte que le reste sera alternativement positif et négatif; donc aussi les intensités

$$1+i,\ 1+i-i',\ 1+i-i'+i''....$$

sont alternativement plus grandes et plus petites que 2, et l'intensité de la lumière envoyée au point R augmente quand l'obstacle existe.

Cette seule considération générale suffirait pour nous montrer comment la grandeur des franges dépend de la longueur de l'onde, de la distance de l'origine lumineuse à l'obstacle qui les produit, à l'écran qui les reçoit. Nous verrions par cela seul qu'elles doivent être plus larges dans la lumière rouge, correspondant à la plus grande longueur d'onde, plus étroites dans la lumière violette, correspondant à la plus petite longueur d'onde : que, si la lumière est blanche ou composée, les bandes diffractées des différentes couleurs occupant des positions différentes, on aura une série de bandes colorées ; le violet ou le bleu se trouvant à l'intérieur, le rouge à l'extérieur : qu'après un petit nombre de successions, les franges disparaîtront complétement par la superposition des diverses couleurs.

135. Il est facile de déterminer les différentes positions d'une même frange pour les différentes positions du point lumineux et de l'écran. En effet, soit P, le bord de l'obstacle, PA une portion d'onde divergente qui vient d'atteindre ce bord,



QR l'écran, R la place d'une frange d'ordre quelconque. Cela posé, pour que ce point R appartienne toujours à la même frange, quelles que soient les distances du centre lumineux et de l'écran, il faut et il suffit que l'intervalle RP—RA, ou la différence des chemins parcourus par les portions centrales et latérales de l'onde, reste constant; car, dans ce cas, l'onde entière AP peut être divisée en un nombre donné de parties telles que la différence entre les distances des points de divisions successives au point R soit constante, et que par conséquent l'onde effective résulte du même nombre de portions élémentaires constituées dans les mêmes circonstances d'interférences; de sorte que l'effet produit en R soit constamment le même. Faisons maintenant :

$$\text{OP} = a, \ \text{PQ} = b, \ \text{QR} = x;$$

en remarquant que x étant très petit par rapport à a et b, on peut dans les développements ne pas tenir compte des puissances supérieures au carré, on aura donc :

$$\text{RP} = \sqrt{b^2+x^2} = b + \frac{x^2}{2b}, \ \text{OR} = \sqrt{(a+b)^2+x^2} = a+b+\frac{x^2}{2(a+b)}$$

$$\text{RA} = b + \frac{x^2}{2(a+b)}, \qquad \text{RP} - \text{RA} = \frac{1}{2}x^2\left(\frac{1}{b} - \frac{1}{a+b}\right)$$

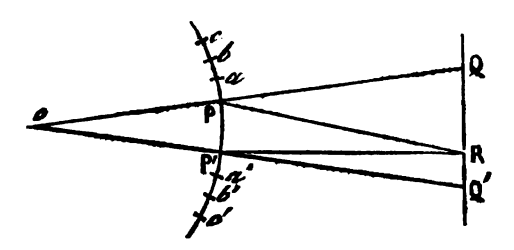
Mais, par hypothèse, cette différence doit être égale à une quantité constante c; on aura donc :

$$\frac{1}{2}x^2\left(\frac{1}{b} - \frac{1}{a+b}\right) = c, x = \sqrt{\frac{2c\,(a+b)\,b}{a}}$$

Si b varie, a restant invariable, c'est-à-dire si on éloigne ou si l'on approche l'écran, on voit par l'équation qui lie x avec b, que x est l'ordonnée d'une hyperbole dont l'abscisse serait b; de sorte que le lieu des points occupés successivement par une même frange est une hyperbole dont l'origine est le bord même de l'obstacle pour lequel $b = o$.

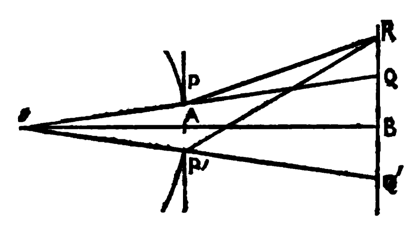
136. Les franges intérieures formées par l'ombre du petit corps opaque proviennent, nous l'avons dit, de l'interférence des deux portions de l'onde qui passent des deux côtés de l'obstacle en rasant

ses bords. Soit PP′ la section du corps opaque, Po et Po′ les deux portions de l'onde divergente qui viennent de raser les bords, et R un point quelconque de l'ombre. Concevons que ces deux portions d'onde soient divisées aux points a, b, c,... a', b', c',... de telle sorte que la différence des distances de deux points consécutifs au point R



soit égale à une demi-ondulation. L'onde, envoyée au point R par chaque onde élémentaire, sera en complète opposition avec celles envoyées par les deux portions voisines; de sorte que si ces diverses portions étaient égales entre elles, elles se neutraliseraient pleinement, à l'exception des deux portions extrêmes Pa, P′ a' dont les moitiés contiguës au bord de l'écran ne sont compensées ou neutralisées par rien.

Or, les portions Pa, ab, bc,... seront à très peu près égales si les lignes menées de leurs extrémités au point R sont suffisamment inclinées à la normale, à la surface de l'onde; ou, en d'autres termes, si le point R est suffisamment éloigné des bords de l'ombre géométrique. Dans ce cas donc les seules portions efficaces de l'onde seront les moitiés des portions extrêmes Pa, et P′ a'; et l'intensité de la lumière au point R sera déterminée par la différence de leurs distances à ce point; ou, ce qui revient au même, par la différence des lignes qui joignent le point R aux deux bords de l'obstacle. Les phénomènes d'interférence seront donc dans ce cas ce qu'ils seraient si la lumière émanait de deux origines très voisines; et nous pouvons appliquer ici ce que nous avons dit dans le numéro 104, c'est-à-dire qu'en appelant e la largeur de l'obstacle, b sa distance à l'écran, x la distance d'une bande quelconque au centre de l'ombre, on aura $x = \frac{n\, b\, l}{2\, e}$.



137. La position des franges formées par une ouverture rectangulaire très étroite sera déterminée par une formule tout-à-fait semblable. Soit PP' la section faite dans l'ouverture, PAP' la portion d'onde qui vient de l'atteindre, QQ' la projection géométrique de l'ouverture sur l'écran. Prenons sur cet écran un point R tel que la différence RP' — RP de ses distances aux bords de l'ouverture soit égale à un nombre entier de demi-ondulations : ce point sera le centre d'une bande obscure ou brillante, suivant que ce nombre entier sera pair ou impair ; car, dans le premier cas, l'onde PAP' peut être divisée en un nombre pair de portions telles que les distances de deux points de divisions consécutifs diffèrent d'une demi-ondulation. Les ondes envoyées au point R par deux portions voisines seront dès lors en complète opposition, et l'effet total produit en ce point sera nul. Si, au contraire, la différence RP' — RP est égale à un nombre impair de demi-ondulations, le nombre des portions d'ondes opposées sera impair, et parce que deux ondes consécutives se neutraliseront au point R, une seule portion restera efficace, ou produira tout son effet.

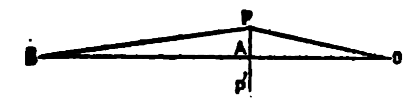
Puisque les bandes successives se forment aux points pour lesquels la différence $RP'—RP=nl$, il est évident que leur distance RB au centre de projection de l'ouverture sera donnée par la même formule que dans le cas précédent $x=\frac{nbl}{2e}$, e devenant la largeur de l'ouverture. Il y aura cependant cette différence essentielle, que les bandes obscures correspondront cette fois aux valeurs paires de n, et les bandes brillantes aux valeurs impaires, ce qui est précisément le contraire de ce qui a lieu pour les franges formées dans l'intérieur de l'ombre d'un corps opaque. Il résulte de ce que nous venons de dire : 1° que les distances des franges successives d'une même couleur forment une progression arithmétique dont la raison est égale à son premier terme ; 2° qu'elles sont proportionnelles à la distance de l'écran, et en raison inverse de la largeur de l'ouverture ; 3° qu'elles varient proportionnellement à la longueur d'onde ;

qu'elles sont par conséquent les plus grandes possibles pour les rayons violets, de grandeur moyenne pour les rayons intermédiaires du spectre.

Nous avons supposé, dans ce qui précède, que l'écran était assez éloigné pour que les franges se formassent toutes en dehors de la projection de l'ouverture, ce qui a lieu quand la différence QP'—QP est inférieure à une demi-longueur d'onde. Si la distance de l'écran devient assez petite pour que la différence QP'—QP surpasse une demi-longueur d'onde, il y aura des franges visibles même dans l'intérieur de la projection de l'ouverture. Dans ce cas, les portions d'ondes élémentaires, dans lesquelles l'onde principale est subdivisée, différeront sensiblement en grandeur et en obliquité; les raisonnements dont nous nous sommes servis ne seront plus applicables, on ne pourra obtenir les positions des points de clarté *maximum* et *minimum* que par le calcul rigoureux et transcendant de l'intensité de la lumière.

138. Les faits de diffraction que nous venons d'étudier sont les plus simples et les plus élémentaires; ils peuvent se modifier et se compliquer à l'infini; et parmi ces phénomènes plus complexes, il en est de trop remarquables pour qu'on puisse les passer sous silence. Un des plus frappants se produit lorsque l'on fait passer un rayon divergent de lumière à travers une petite ouverture circulaire, par exemple à travers le trou fait par une pointe d'épingle dans une feuille mince de plomb. Si l'on regarde la lumière transmise à travers une loupe, l'image de l'ouverture apparaît comme une tache brillante entourée d'anneaux colorés très vifs, et qui se nuancent d'une manière très belle et très curieuse, lorsqu'on fait varier la distance de l'œil ou de l'ouverture au centre lumineux. Si la distance de l'œil à l'ouverture est grande, la tache centrale est blanche, et les anneaux colorés se suivent dans le même ordre que ceux des plaques minces. A mesure que l'œil se rapproche de l'ouverture, la tache centrale se contracte, se réduit bientôt à un point, et disparaît. Les anneaux se resserrent alors de plus en plus, et passent successivement au centre, qui prend ainsi les nuances les plus vives, tandis que les anneaux changent brusquement de couleur, en se succédant comme dans le cas des anneaux des plaques minces vues par réflexion : cette coïncidence remarquable est une conséquence très simple de la théorie.

Il a été rigoureusement démontré que l'intensité de la lumière d'une couleur simple à la tache centrale, ou de la teinte composée dans le cas de la lumière blanche, est la même que celle de la lumière réfléchie par une lame d'air dont l'épaisseur serait dans un certain rapport avec le rayon de l'ouverture et ses distances au centre lumineux et à l'œil. Avec de la lumière homogène l'illumination de la tache centrale s'évanouit périodiquement quand on fait varier la distance de l'œil à l'ouverture. Pour prouver qu'il en est réellement ainsi, supposons que O est le point lumineux, et OAB la ligne menée de ce point au centre de l'ouverture PP′, et faisons $OA = a$, $AB = b$, $AP = e$; comme e est très petit en comparaison de a et de b, on pourra négliger les puissances supérieures au carré, et l'on aura :



$$OP = a + \frac{e^2}{2a}\ BP = b + \frac{e^2}{2b},\ OP + PB - OB = d = \frac{1}{2}e^2\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b}\right)$$

Si cet intervalle d est égal à un nombre entier de demi-ondulations, on pourra subdiviser l'ouverture par une série de cercles concentriques en un nombre de parties telles, que les rayons qui arrivent au point B, après avoir touché deux circonférences successives, diffèrent d'une quantité égale à une demi-longueur d'onde. Il résulte de la formule qui précède que les carrés des rayons, et par conséquent les surfaces des cercles successifs ainsi formés, sont comme les nombres naturels 1, 2, 3, 4, etc., de sorte que les anneaux compris entre deux circonférences consécutifs seront égaux. Mais l'onde élémentaire provenant de chaque anneau sera en complet désaccord avec les deux ondes contiguës : les actions des anneaux successifs se détruiront donc mutuellement, et l'intensité de la lumière au point B sera nulle ou égale à celle du dernier anneau, suivant que le nombre des anneaux, y compris le cercle central, sera pair ou impair. Donc pour une ouverture donnée il y a sur l'axe une succession de points pour lesquels l'intensité de la lumière est alternativement nulle ou maximum; et il résulte évidemment de la discussion précédente : 1° que les distances de ces points seront les valeurs de b, données

par l'équation $e^2\left(\frac{1}{a}+\frac{1}{b}\right)=nl$; 2° que les points de complète obscurité répondront aux valeurs paires de n; les points de clarté maximum aux valeurs impaires de n. Voilà ce qui se passe avec la lumière homogène : comme les points d'intensité maximum ou minimum seront différents pour les rayons de différentes couleurs, il n'y aura avec la lumière composée aucun point d'obscurité absolue, mais seulement une succession de points pour lesquels le centre de l'ouverture est richement coloré.

139. La théorie de Fresnel ne se trouva pas seulement en parfait accord avec les faits connus : elle prévit et put prédire une multitude de circonstances que l'on a vérifiées depuis par expérience; elle mit en évidence plus d'une fois des phénomènes tout-à-fait inattendus. Un des plus étonnants est dû à la diffraction produite par un disque circulaire. En appliquant à ce cas l'intégrale de Fresnel, Poisson arriva à ce résultat extraordinaire, que l'illumination du centre de l'ombre doit être précisément la même que si le disque était enlevé ou percé en son milieu. Les principes auxquels nous avons déjà eu recours suffiraient pour nous convaincre, sans calculs difficiles, de la vérité de cette conclusion. M. Arago passa le premier à l'expérience, et le succès fut complet. Ici donc le centre de l'ombre géométrique se trouvait éclairé. Quel triomphe pour la théorie des ondulations! On raconte que M. Arago répéta un jour cette belle expérience devant l'empereur Napoléon, et que celui-ci, émerveillé, ne pouvait pas croire que le disque ne fût pas percé de part en part; on dit encore que l'illustre Laplace, défenseur ardent et éclairé de la théorie de l'émission, rendit ce jour-là noblement les armes, et s'avoua convaincu.

140. Nous avons vu que, lorsqu'un rayon divergent de lumière rase les bords d'un cheveu ou d'un fil de fer très fin, on voit apparaître une série de franges colorées et parallèles aux bords de l'ombre. Les distances de ces bandes à l'ombre et leurs distances mutuelles sont d'autant plus grandes que le diamètre du fil est plus petit. Si l'on place devant le rayon lumineux plusieurs fils semblables, non pas parallèles, mais croisés et entrelacés en tous sens, il est facile de voir que les bandes colorées se transformeront alors en cercles concentriques, dont le centre sera le point lumineux, et

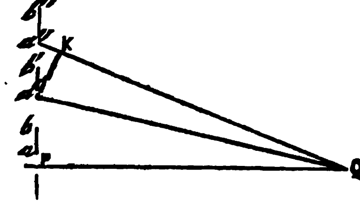
que l'on peut comparer aux halos et aux couronnes qui entourent le soleil ou la lune dans un ciel nuageux. Leur diamètre est en raison inverse de la ténuité des fils.

Ces phénomènes furent observés d'abord par Young, qui en fit une application très ingénieuse à l'appréciation comparative du diamètre des fibres et des petites particules de toute espèce. On fait dans une plaque métallique un trou circulaire de moins d'un demi-millim.; autour de cette ouverture, à une distance de 9 ou de 12 millim., on perce une nouvelle série circulaire de trous beaucoup plus petits. On place derrière l'ouverture la flamme d'une lampe, et l'on regarde le point lumineux à travers la substance que l'on veut examiner. On voit alors apparaître autour de l'ouverture un anneau ou halo, et en éloignant ou rapprochant la substance le long d'une règle graduée, on peut faire coïncider l'anneau avec le cercle de petits trous percés dans la plaque. On lit ensuite sur la règle la distance de l'ouverture qui varie en raison inverse du diamètre angulaire des spectres; mais le diamètre des particules varie dans la même raison inverse : donc la seule distance lue sur la règle peut être regardée comme la mesure de ces diamètres. Young a comparé de cette manière les diamètres d'un très grand nombre de substances, comme les fibres des laines très fines, les globules du sang.... L'instrument que nous venons de décrire a reçu de lui le nom d'Ériomètre.

141. Nous avons supposé dans ce que nous venons de dire que les intervalles des fibres ou des fils fins étaient beaucoup plus grands que leur épaisseur. Dans ce cas les phénomènes observés dépendent uniquement du diamètre des fibres opaques; mais si ces intervalles étaient par trop petits, il faudrait tenir compte de leur grandeur qui modifie les phénomènes. Si, par exemple, on forme un petit réseau en tendant un fil fin entre deux vis de pas égaux et très petits, et si l'on place ce réseau dans un rayon divergent, on aperçoit à droite et à gauche de l'image directe une série de spectres colorés des couleurs du prisme, et qui s'épanouissent en diminuant d'intensité à mesure que l'on s'éloigne du centre. Pour mieux réussir dans cette expérience, on fixe devant l'objectif d'une lunette le réseau éclairé par une fente lumineuse très étroite; les spectres viennent alors se former au foyer de la lunette avec une grande netteté, et sont amplifiés par l'oculaire. Fraunhofer, qui a observé

ces phénomènes avec beaucoup d'attention et de soin, a compté plus de treize spectres de chaque côté de l'image centrale. Le premier spectre est complétement isolé ; il est séparé de l'image et du second spectre par un intervalle complétement obscur. En mesurant avec la plus grande précision plusieurs réseaux parallèles, Fraunhofer s'est assuré que les distances à l'image centrale pour une même couleur dans les spectres successifs forment une progression arithmétique, dont la raison est égale à son premier terme, et que la valeur absolue de ces distances est en raison inverse de l'intervalle compris entre deux fils.

Ces lois sont une conséquence très simple du principe des interférences. La première paire de spectres est produite par l'interférence des rayons pour lesquels les chemins parcourus diffèrent d'une longueur d'onde ; la seconde paire, par les rayons dont les chemins diffèrent de deux longueurs d'onde, et ainsi de suite. Supposons qu'un rayon de lumière venue d'une source très éloignée tombe sur le réseau, dont les parties opaques sont représentées par $a\ b$, $a'\ b'$, $a''\ b''$; et plaçons l'œil en Q.



Prenons une portion $a'\ a''$ du réseau, composée d'une partie opaque et d'un intervalle éclairé, de telle sorte que la différence des distances de leurs extrémités au point Q, Qa'', Qa' soit égale à une longueur d'onde. Il est évident que la portion correspondante $a'\ a''$ de l'onde incidente peut être divisée en deux parties sensiblement égales, et ces parties seront telles que les ondes élémentaires qu'elles envoient au point Q soient en complète opposition. Sans le réseau, l'effet de cette portion $a'\ a''$ de l'onde incidente serait nul au point Q, et la lumière n'atteindrait pas l'œil. Le rôle du réseau est donc d'intercepter la totalité ou une partie de l'une des ondes élémentaires et de rendre à la seconde tout son effet. Cet effet sera le plus grand possible, lorsque les intervalles de plein et de vide du réseau seront égaux. Dans tous les cas, une frange brillante sera visible dans la direction Q a''. Il est évident que la même chose arrivera pour toutes les divisions semblables du réseau, dont les extrémités seront telles que les dif-

férences de leurs distances au point Q différeront de deux, trois,... plus généralement d'un nombre entier de longueurs d'onde, et que par conséquent on verra une succession de franges à différentes distances angulaires, qu'il est facile de calculer. Soit, en effet, $a' k$, un arc de cercle décrit du point Q, on aura :

$$a'' k = a' a'' \cos a'a''k = a' a'' \sin PQa''.$$

Mais $a'' k = a'' Q - a' Q = l$; donc en appelant θ_1 l'angle PQa'', correspondant à la première bande, et faisant $a' a'' = e$ on aura :

$$\sin \theta_1 = \frac{l}{e};$$

pour la bande de l'ordre n on aura :

$$\sin \theta_n = \frac{n l}{e}.$$

Faisons ressortir une circonstance vraiment remarquable du phénomène dont nous venons d'établir les lois. Si l'expérience est faite avec tout le soin requis, les diverses sortes de rayons homogènes sont si pures, si exemptes de tout mélange dans le spectre, qu'on peut distinguer les lignes fixes ou les lignes qui séparent les couleurs, ce qui prouve qu'elles sont complétement indépendantes de la réfraction, et qu'elles existent dans la lumière solaire avant qu'elle ait été décomposée par le prisme. Une particularité tout-à-fait digne d'attention, c'est que les distances des lignes fixes dans le spectre diffracté sont toujours proportionnelles, quelle que soit la substance diffringente, tandis que les rapports des intervalles de ces mêmes lignes ou les largeurs des espaces colorés dans le spectre formé par réfraction varient avec le pouvoir dispersif du prisme. Ce seul fait semble suffire à renverser la théorie de Newton, qui attribue la réfraction et la diffraction à une seule et même cause. Ajoutons que le spectre diffracté est par là même comme un type invariable, auquel on peut comparer tous les autres.

La formule $\sin \theta_n = \frac{n l}{e}$ fournit une méthode très simple pour déterminer la longueur d'onde correspondante à un rayon quelconque du spectre. On peut mesurer avec facilité et avec la plus

grande précision l'intervalle e, ou la distance des axes de deux fils, de sorte qu'il ne reste à évaluer que l'angle θ_n, que le rayon simple fait avec l'axe pour obtenir la longueur d'onde l. Fraunhofer a calculé de cette manière les longueurs d'onde correspondantes aux sept principales lignes fixes du spectre, et les valeurs qu'il a obtenues sont peut-être les constantes les plus exactes que l'optique possède.

142. Les expériences des réseaux intéressent sous beaucoup de points de vue. L'apparence des spectres latéraux aussitôt après l'interception d'une partie de la lumière prouve que la lumière diverge actuellement dans toutes les directions à partir du front de la grande onde, et que si dans les circonstances ordinaires ces ondes élémentaires sont inefficaces, cela tient uniquement à l'interférence des deux parties, dont l'une est interceptée par le réseau.

Les belles apparences que nous avons décrites peuvent être variées à l'infini en changeant la forme des réseaux. Ainsi, quand deux réseaux composés de fils parallèles et équidistants sont croisés à angle droit, de manière à former un réseau à ouvertures carrées, le phénomène produit est d'une splendeur admirable.

On peut construire des réseaux de bien des manières, par exemple, en traçant avec un diamant fin un certain nombre de lignes parallèles sur du verre. Fraunhofer obtint de cette manière des surfaces rayées, dont les stries restaient invisibles, même avec le grossissement des plus forts microscopes. L'intervalle de deux traits ne dépassait pas un dix-millième de millimètre; l'industrie française a dépassé de beaucoup ces prodiges de division.

Si l'on grave sur une surface polie un grand nombre de lignes parallèles à des intervalles égaux et très petits, la lumière réfléchie par les intervalles ou les creux ainsi formés interfère d'une manière entièrement analogue à celle qui traversait les ouvertures des réseaux, et donne ainsi naissance aux spectres les plus brillants. On a obtenu des surfaces métalliques gravées sur lesquelles les traits étaient si serrés qu'il en fallait plus de 500 pour couvrir l'espace d'un millimètre. Les spectres formés sous l'influence de surfaces aussi parfaitement divisées sont aussi tranchés que ceux que l'on obtient à l'aide des prismes les plus purs et les mieux travaillés : les couleurs qu'elles déploient par la réflexion de la lu-

mière d'une bougie rivalisent avec les feux éclatants des plus beaux diamants.

On observe jusqu'à un certain point les mêmes apparences sur les surfaces métalliques, polies à l'aide d'une poudre qui ne soit pas trop déliée. Les stries laissées à la surface donnent naissance à des réseaux, que l'on obtient encore en passant simplement le doigt sur un verre recouvert d'haleine humide.

Les admirables couleurs de la nacre sont des cas particuliers des phénomènes que nous venons de décrire. Cette substance est formée d'un nombre immense de couches déposées successivement dans la coquille de l'huitre. La coupe qu'on obtient en la travaillant est formée d'une série de lignes sinueuses, et la nacre même très polie est sillonnée par une infinité de stries, qui sont les bords des diverses couches. On découvre ces stries à l'aide d'un puissant microscope, quoiqu'elles soient souvent tellement serrées que mille d'entre elles n'occupent pas 5 millimètres. Une expérience très simple de M. Brewster a prouvé jusqu'à l'évidence que ces stries sont la cause réelle des couleurs qui se déploient à la surface de la nacre. Il obtint sur de la cire très blanche et très pure une empreinte de ces stries, et vit non sans surprise que l'empreinte reproduisait les mêmes couleurs que la nacre. En réalité, les couleurs des surfaces striées mettent non moins en évidence leur structure que les autres moyens même mécaniques, et M. Brewster a fait une belle application des lois que nous avons rappelées à la structure des lentilles cristallines chez les poissons et autres animaux. Les brillantes couleurs des plumes de certains oiseaux, leurs incomparables reflets sont aussi des phénomènes de réseau.

143. Quand on observe une étoile brillante avec une lunette excellente, mais d'un grossissement assez faible, elle a toujours l'apparence d'une masse de lumière, dont il est impossible de distinguer la forme à cause de son éclat, et dont les bords sont rarement exempts de dentelures. Mais si le pouvoir amplifiant s'élève jusqu'à 200, 300 ou 400 fois, et qu'on se trouve dans des circonstances favorables, l'étoile parait parfaitement ronde, bien terminée et entourée de plusieurs anneaux alternativement obscurs et lumineux, dont les bords semblent légèrement colorés. Ces anneaux sont évidemment de fausses images dues à des effets d'optique, à des in-

terférences. Lorsque l'ouverture de la lunette est limitée par un diaphragme circulaire, le disque et les anneaux s'élargissent en raison inverse du diamètre de l'ouverture. Lorsque celle-ci est réduite, à 0,027 par exemple, pour une lunette de 21 mètres de distance focale, le faux disque devient très grand, et est entouré d'un seul anneau, dont les couleurs sont disposées comme il suit : blanc, rouge, noir, bleu, brun, rouge, noir. Quand on emploie des ouvertures annulaires, ces phénomènes sont très beaux et très réguliers. Lorsque l'ouverture a la forme d'un triangle équilatéral, on voit se peindre un disque étoilé très brillant et bien terminé : les six raies qui l'entourent en sont séparées par un anneau noir. Ces faits curieux ont été étudiés avec un très grand soin par MM. Herschell et Arago; M. Airy en a donné une théorie mathématique dans son traité si remarquable de la théorie des ondulations. Le calcul, cette fois encore, a pleinement confirmé l'observation.

144. Fresnel doit être regardé comme le véritable créateur de la théorie de la diffraction, quoiqu'il soit vrai de dire qu'il en a établi les lois *à posteriori*, d'une manière indirecte. Il n'est pas parti des équations générales du mouvement vibratoire; mais à l'aide du calcul intégral qu'il maniait avec adresse, il a su trouver les sommes des effets infiniment petits produits par les diverses ondes élémentaires, dans lesquelles, suivant les principes d'Huygens, l'onde principale peut être décomposée. Il réduisit de cette manière le calcul si exact des phénomènes à l'évaluation de deux intégrales définies, et comme ces intégrales définies échappant à tous les moyens connus ne pouvaient pas être calculées de toute pièce, il eut la patience d'en déterminer les éléments divers en faisant varier d'un dixième à chaque opération la valeur de la variable dont elles dépendent.

Il restait encore deux pas à faire, l'un de pratique, si je puis m'exprimer ainsi, et qui consistait à rendre facile le calcul des intégrales définies, l'autre de théorie, et que personne n'avait encore tenté : déduire des formules qui représentent les mouvements infiniment petits d'un système de points matériels, une théorie mathématique des ombres et de la diffraction; montrer comment ces formules abstraites, et en apparence si continues, renferment ces alternatives réelles de lumière et d'ombre que le physicien a su observer, et mesurer à travers les difficultés les plus nombreuses.

Dès 1836, M. Cauchy avait réalisé cet immense progrès. Nos lecteurs nous sauront gré d'exposer ses découvertes avec quelques développements. Nous ne sommes pas parvenus sans peine à grouper en les résumant des matériaux précieux disséminés dans un grand nombre de volumes et de mémoires.

145. Disons d'abord un mot du calcul des intégrales dont dépend la diffraction ; ces deux intégrales sont :

$$A = \int_0^m \cos \frac{\pi z^2}{2} dz, \quad B = \int_0^m \sin \frac{\pi z^2}{2} dz$$

et pour les calculer facilement M. Cauchy a enfin trouvé les deux formules suivantes :

$$A = \frac{1}{2} - N \cos \frac{m^2 \pi}{2} + M \sin \frac{m^2 \pi}{2} - \ldots..$$

$$B = \frac{1}{2} - M \cos \frac{m^2 \pi}{2} - N \sin \frac{m^2 \pi}{2}.$$

dans lesquelles π étant le rapport de la circonférence au diamètre M, N sont données par les deux séries :

$$M = \frac{1}{m\pi} - \frac{1.3}{m^5 \pi^3} + \frac{1.3.5.7}{m^9 \pi^5} - \ldots$$

$$N = \frac{1}{m^3 \pi^2} - \frac{1.3.5}{m^7 \pi^3} + \ldots$$

ou, ce qui revient au même, en mettant pour π sa valeur approchée :

$$M = \frac{0,31831}{m} - \frac{0,09675}{m^5} + \frac{0,34311}{m^9} - \ldots$$

$$N = \frac{0,10132}{m^3} - \frac{0,15399}{m^7} + \ldots$$

Si, pour fixer les idées, on attribue successivement à m les valeurs entières 2, 3, 4, 5, on conclura des formules qui précèdent que les valeurs des deux intégrales définies A, B sont :

Pour $m = 2$, $A = 0,4885$, $B = 0,3432$,
$m = 3$, $A = 0,6058$, $B = 0,4962$,
$m = 4$, $A = 0,4984$, $B = 0,4205$,
$m = 5$, $A = 0,5638$, $B = 0,4992$.

Ces valeurs sont exactes jusqu'au dernier chiffre, et coïncident, pour $m = 2$, avec celles que Fresnel a trouvées par la méthode d'approximation, de laquelle il a déduit, avec plus de peine et moins d'exactitude, les valeurs correspondantes à $m = 3$, $m = 4$, $m = 5$....

Nous avons rapporté ces formules et ces nombres dans l'intérêt des physiciens, auxquels ils épargneront des calculs pénibles. Faisons maintenant ressortir un des plus beaux titres de gloire de M. Cauchy, sa théorie directe et générale de la diffraction; les découvertes que cette belle théorie lui a fait faire.

146. En vertu du théorème de Fourier, toute fonction continue ou même discontinue, et par conséquent les déplacements des molécules déterminés par l'intégration des équations aux dérivées partielles qui représentent les mouvements infiniment petits d'un système de molécules, peuvent être représentés par la somme d'un nombre fini ou infini d'exponentielles réelles ou imaginaires; par suite, comme nous l'avons déjà remarqué dans nos précédentes analyses, tout mouvement infiniment petit qui se propage à travers un système de molécules peut être considéré comme résultant de la superposition d'un nombre fini ou infini de mouvements simples; d'ailleurs un mouvement simple peut être durable et persistant, ou s'affaiblir et s'éteindre avec le temps, ou croître indéfiniment tandis que le temps augmente. Pareillement un mouvement simple peut se propager dans l'espace sans s'affaiblir, ou bien il peut croître ou décroître, suivant que l'on s'éloigne dans un sens ou dans un autre d'une surface donnée, par exemple du plan des y, z. Enfin, dans un mouvement simple qui ne s'affaiblit pas en se propageant à travers l'espace, les ondes planes peuvent marcher dans un sens ou dans un autre, par exemple dans le sens des x positives ou dans le sens des x négatives. Cela posé, considérons d'abord, dans un système de molécules, le mouvement produit au bout du temps t par un ébranlement initial et infiniment petit qui ne s'étendait pas au-delà d'une certaine enveloppe. Pour que ce mouvement, en se propageant dans l'espace, reste toujours infiniment petit, il sera nécessaire qu'il ne croisse indéfiniment ni avec le temps ni avec la distance; par conséquent il sera nécessaire que, dans les exposants des exponentielles dont la somme représentera la valeur générale de chaque inconnue, le coefficient du temps ou d'une longueur absolue n'offre

jamais de partie réelle positive. Cette condition se trouve généralement remplie pour les intégrales qui représentent le mouvement produit dans un système de molécules par un ébranlement initial imprimé au système dans le voisinage d'un point donné, et par suite ces intégrales fournissent effectivement, comme on devait s'y attendre, les valeurs générales des déplacements et des vitesses moléculaires, au bout d'un temps quelconque. Mais si l'on suppose qu'un mouvement infiniment petit, propagé dans la portion de l'espace qui est située par rapport au plan des y, z, du côté des x négatives, doive être sans cesse transmis à la portion de l'espace situées du côté des x positives, à travers une surface, ou, si l'on veut, à travers une ouverture terminée dans ce plan, par un certain contour, en sorte que le mouvement se trouve intercepté par le plan en chacun des points situés au-dehors du même contour, alors on obtiendra souvent, pour représenter les valeurs générales des inconnues, des formules qui sembleront paradoxales au premier abord. En effet, les valeurs des inconnues étant réduites à des sommes d'exponentielles, il arrivera souvent que, dans les exposants de quelques exponentielles, les coefficients des distances absolues offriront des par ties réelles positives. Donc, alors, quelques uns des mouvements simples dont les exponentielles seront les symboles caractéristiques, sembleront devoir devenir de plus en plus sensibles, et croître indéfiniment aux yeux d'un observateur qui s'éloignerait indéfiniment du plan des y, z du côté des x positives. Il y a plus : parmi les mouvements simples correspondants aux mêmes exponentielles, ceux qui se propageront sans s'affaiblir offriront souvent cette circonstance remarquable, que les uns sembleront devoir se propager dans le sens des x positives, les autres en sens contraire ; cependant il paraît absurde de supposer qu'un mouvement infiniment petit, propagé dans un système de molécules du côté des x négatives, fasse naître du côté des x positives des mouvements simples qui croissent indéfiniment avec la distance au plan des y, z, ou des mouvements simples dans lesquels les ondes planes soient ramenées vers ce plan. Pour faire disparaître ces paradoxes, il suffit de considérer les valeurs des déplacements moléculaires donnés par l'intégration comme composées chacune de deux parties, et d'admettre que la première partie représente le déplacement d'une molécule dans un mouvement

infiniment petit, qui se transmet et se propage du côté des x positives, mais que la seconde partie, prise en signe contraire, représente le déplacement d'une molécule dans un mouvement réfléchi, c'est-à-dire dans un mouvement qui se propage du côté des x négatives, en se superposant au mouvement donné. Alors, pour obtenir le mouvement transmis, on doit superposer les uns aux autres, ceux des mouvements simples et relatifs aux diverses exponentielles, qui se propagent dans le sens des x positives, ou s'affaiblissent et s'éteignent quand on s'éloigne dans le même sens du plan des y, z; au contraire, pour obtenir le mouvement réfléchi, on doit superposer les uns aux autres les mouvements directement opposés aux mouvements simples qui se propagent dans le sens des x négatives, ou s'affaiblissent et s'éteignent quand on s'éloigne dans ce même sens du plan des y, z. En opérant ainsi, on verra toutes les difficultés s'évanouir. On pourrait objecter, il est vrai, que l'intégration effectuée semblait avoir pour but la recherche unique des déplacements et des vitesses des molécules situées, par rapport au plan des y, z, du côté des x négatives; mais l'analyse, en nous conduisant à des formules qui sont inadmissibles quand on se borne à tenir compte du mouvement transmis, prouve qu'en ayant égard à ce seul mouvement on ne peut résoudre la question proposée. D'ailleurs, pour interpréter avec justesse les intégrales obtenues, il est nécessaire de revenir sur ses pas et d'examiner, d'une part, quelles sont les données que l'on a introduites dans le calcul; d'autre part quelles sont les quantités dont l'intégration peut fournir la valeur. Or, ici les données du problème sont évidemment les déplacements et les vitesses des molécules dans le plan des y, z, ou plutôt dans une tranche infiniment mince comprise entre le plan des y, z, et un plan parallèle infiniment voisin. Ces déplacements et ces vitesses sont tout ce que l'intégration emprunte aux faits énoncées: supposées connues à une époque quelconque, elles sont considérées comme l'origine et la cause permanente des mouvements qui se propagent hors de la tranche dont il s'agit; et les inconnues du problème sont précisément les déplacements et les vitesses des molécules situées hors de cette même tranche. Du reste il suffit que les valeurs générales des inconnues aient la double propriété de vérifier les équations différentielles des mouvements infiniment petits, et de se réduire dans

l'épaisseur de la tranche aux valeurs données : il importe peu que les nouveaux mouvements simples, dont la naissance permettra de remplir cette double condition, soient des mouvements transmis ou des mouvements réfléchis. D'ailleurs, comme l'expérience prouve que des mouvements peuvent être réfléchis, et se réfléchissent en effet, dans certaines circonstances, il est clair que rien ne s'oppose à ce qu'on admette comme véritable l'interprétation à laquelle M. Cauchy est parvenu ; c'est même, à ce qu'il semble, une chose digne d'être remarquée, que l'examen approfondi des formules données par l'analyse l'ait nécessairement conduit à la notion de mouvements réfléchis.

147. Les principes que nous venons d'exposer nous paraissent applicables à la recherche des lois suivant lesquelles un rayon de lumière, propagé dans un milieu transparent, surtout dans l'éther isolé, du côté des x négatives, est transmis à la portion de ce milieu situé du côté des x positives, à travers une ouverture pratiquée dans un écran très mince, dont une surface coïncide avec le plan des y,z. Ce dernier problème est précisément celui des ombres et de la diffraction. Il diffère très peu du problème que nous venons de résoudre. La principale différence entre l'un et l'autre consiste en ce que, dans la question ci-dessus traitée, on n'a point spécifié la cause en vertu de laquelle le mouvement se trouvait en partie intercepté par la tranche infiniment mince dont une surface coïncide avec le plan des y,z, et que l'on a raisonné, au contraire, comme si cette tranche pouvait acquérir le pouvoir d'intercepter le mouvement sans cesser d'être formée avec les molécules qui composent le milieu donné. On pourrait donc craindre qu'il fût nécessaire de faire intervenir la nature même de l'écran dans la solution du problème des ombres et de la diffraction ; et dans la réalité, pour résoudre le problème avec une rigueur mathématique, il conviendrait non seulement de spécifier la substance dont se forme l'écran, mais encore de calculer l'extinction des rayons lumineux opérée par cette substance. Toutefois, comme l'expérience prouve que la nature de l'écran n'a pas d'influence sur la nature des phénomènes observés et sur les lois de la diffraction, il paraît que, dans la recherche de ces lois, on peut sans inconvénient se borner à développer les conséquences des formules auxquelles on arrive par la méthode ci-dessus exposée.

148. Nous avons maintenant à signaler une conclusion extraordinaire à laquelle conduisent les principes que nous venons d'établir. Cette conclusion est que, si la lumière passe à travers une ouverture pratiquée dans un écran, cette circonstance fera naître généralement deux espèces de rayons diffractés, les uns transmis, les autres réfléchis. Remarquons d'ailleurs qu'il s'agit en ce moment, non pas de rayons réfléchis par la portion de l'écran qui avoisine l'ouverture, mais de rayons réfléchis, si je puis le dire, par cette ouverture même. Si jusqu'ici l'on n'a observé que les rayons transmis, cela tient sans doute à ce qu'il est beaucoup plus facile de les apercevoir à côté de l'ombre que porte l'écran. Il serait intéressant d'examiner si, en faisant usage d'un écran très noir, et qui absorberait, autant que possible, tous les rayons incidents, on ne parviendrait pas à rendre sensibles les nouveaux rayons réfléchis et diffractés. Au reste, dans certains cas particuliers et sous certaines conditions, les rayons réfléchis peuvent disparaître.

149. La méthode que nous venons d'exposer pour traiter le problème des ombres et de la diffraction n'est pas la seule qui fournisse la solution de ce problème. En examinant ce qui arrive lorsqu'un rayon simple est transmis d'un premier milieu à un second, à travers une surface plane, M. Cauchy avait trouvé, comme nous l'avons déjà expliqué, six équations de conditions relatives à la surface. Ces équations sont celles qui expriment que les déplacements d'une molécule, mesurés parallèlement aux axes coordonnées, et les dérivées de ces déplacements prises par rapport à x, acquièrent les mêmes valeurs sur la surface prise pour plan des y,z, soit que l'on considère la molécule comme appartenant au premier ou au second milieu. Il avait remarqué d'ailleurs que, si un rayon simple se propage dans le premier des deux milieux, et tombe sur la surface plane, la réflexion et la réfraction feront naître, dans chaque milieu, non seulement les deux rayons qui peuvent être perçus par l'œil, savoir, ceux dans lesquels les vibrations moléculaires sont transversales ou sensiblement transversales, mais encore un troisième rayon dans lequel les vibrations moléculaires seraient longitudinales, s'il se propageait sans s'affaiblir. On aura donc à déterminer les symboles caractéristiques et les paramètres symboliques de trois rayons réfléchis et de trois rayons réfractés. Or, comme nous l'avons dit,

pour que les conditions relatives à la surface réfléchissante puissent être vérifiées, il sera d'abord nécessaire que les symboles caractéristiques des six rayons réfléchis et réfractés deviennent égaux sur la surface au symbole caractéristique du rayon incident ; et, cette égalité étant admise, non seulement les directions des plans des ondes et des vibrations moléculaires seront connues dans les six nouveaux rayons, mais, de plus, ces six équations de condition suffiront pour déterminer les seules inconnnes que présentera encore le problème, savoir, les six paramètres symboliques correspondants aux trois rayons réfléchis et aux trois rayons réfractés.

Dans le mémoire que nous venons de rappeler, la surface plane, traversée par les rayons lumineux, avait une étendue infinie. Considérons maintenant le cas où cette surface ne se laisserait traverser par la lumière que dans les points situés entre deux droites parallèles, et jouerait le rôle d'un écran pour tous les points situés hors de ces mêmes droites. La portion de la surface plane comprise entre les deux droites pourra être envisagée comme une fente pratiquée dans un écran, et à travers laquelle la lumière est transmise. Le problème à résoudre sera de trouver les lois suivant lesquelles s'effectue cette transmission. Or, pour obtenir la solution désirée, il suffira de recourir aux six équations de condition ci-dessus mentionnées, et de représenter dans le rayon incident les déplacements des molécules situées sur la surface de l'écran, et les dérivées de ces déplacements prises par rapport à x, à l'aide d'intégrales définies doubles qui aient la propriété de s'évanouir hors des limites correspondantes aux deux bords de la fente. D'ailleurs, la reflexion et la réfraction, produites par la surface de séparation des deux milieux, feront naître, comme dans le cas où cette surface était illimitée, trois rayons réfléchis et trois rayons réfractés. Si les milieux sont transparents, deux des trois rayons pourront être perçus par l'œil dans chaque milieu, et ces deux rayons se réuniront en un seul dans les milieux isophanes. Quant au troisième rayon, il s'éteindra toujours à une petite distance de la surface réfléchissante. Ajoutons que, dans chacun des six nouveaux rayons, les déplacements symboliques des molécules pourront être exprimés chacun à l'aide d'une intégrale définie double. Lorsque la fente deviendra infiniment grande, les six intégrales correspondantes aux six

rayons se réduiront, comme on devait s'y attendre, à six exponentielles qui représenteront les symboles caractéristiques de ces rayons, et chaque onde plane aura une étendue illimitée, soit dans le premier, soit dans le second milieu; mais il n'en sera plus de même si la fente devient très étroite, et, dans ce dernier cas, chacun des rayons qui se propagera sans s'affaiblir se transformera en un filet de lumière dont la nature se déduira de la discussion de l'intégrale correspondante. Or, les six intégrales étant de même nature, on pourra en dire autant des six rayons, et chacun d'eux sera du genre de ceux qu'on nomme rayons diffractés. Donc, lorsqu'une fente pratiquée dans un écran très mince, qui couvre la surface de séparation de deux milieux, permet à un filet de lumière de rencontrer cette surface, les rayons réfléchis par la surface sont diffractés aussi bien que les rayons transmis.

150. Considérons maintenant le cas particulier où, les deux milieux étant transparents et isophanes, la nature du second milieu devient identique avec celle du premier, alors dans chaque milieu les deux rayons qui se propagent sans s'affaiblir se réuniront en un seul. Mais cette circonstance n'entraînera nullement la disparition des rayons réfléchis, dont, au contraire, on sera obligé de tenir compte pour vérifier les six équations de condition relatives à la surface de l'écran. Nous voici donc amenés de nouveau à la conclusion singulière à laquelle nous avions été conduits par un examen attentif des intégrales générales qui représentent un mouvement transmis et propagé dans un seul milieu à travers une portion de surface plane. Ainsi les deux méthodes que nous avons suivies nous indiquent l'une et l'autre un nouveau phénomène qui paraît propre à éveiller l'attention des physiciens, et la seconde méthode a l'avantage de montrer comment ce nouveau phénomène se lie aux phénomènes déjà connus.

Cette conclusion, tout étrange qu'elle paraisse, ne doit pas être considérée seulement comme un résultat du calcul; car, en l'entendant énoncer dans une séance de l'Académie, M. Arago s'est rappelé une expérience qu'il avait faite autrefois avec Fresnel, et dans laquelle ils avaient observé des franges qui accompagnaient des rayons réfléchis par des sillons arbitrairement tracés sur la surface d'un verre noirci par la fumée. Il y a donc lieu de rechercher les lois de la diffraction,

non seulement dans les rayons transmis, mais encore dans les rayons réfléchis par la surface de séparation de deux milieux transparents.

151. Supposons qu'un rayon de lumière passe d'un milieu transparent et isophane dans un autre milieu isophane séparé du premier par une surface plane qui sera prise pour plan des y, z ; supposons encore que ce plan intercepte généralement la lumière, et ne se laisse traverser par elle que dans les points situés en dedans d'un certain contour très resserré : ce qui aurait lieu, par exemple, si la surface de séparation des deux milieux était recouverte par un écran très noir, dans lequel une très petite ouverture serait pratiquée. Si le rayon incident est simple, le rayon réfléchi qui se propagera dans le premier milieu cessera d'être un rayon simple, tout comme le rayon transmis au second milieu. Ces deux rayons, dont chacun résultera de la superposition d'une infinité de rayons simples, seront l'un et l'autre de la nature de ceux que l'on nomme rayons diffractés. Chacun d'eux offrira un filet de lumière très étroit, et l'intensité de la lumière, mesurée dans un plan perpendiculaire à l'axe du filet, s'évanouira sensiblement à une distance sensible de cet axe. Il y a plus, cette intensité variera sur les bords du filet de manière à présenter divers maxima et minima. Enfin, comme ces maxima et minima répondront à des points diversement situés pour des couleurs diverses, il en résulte que, si le rayon incident est un rayon formé par la superposition de plusieurs autres inégalement réfrangibles, s'il est, par exemple, un rayon blanc de lumière ordinaire, chacun des deux rayons réfléchi et réfracté offrira sur les bords des franges colorées. Les couleurs des franges se réduiraient à une seule, si le rayon incident était un rayon homogène. D'ailleurs la position des franges dans un rayon homogène, et par suite dans un rayon composé, se déduira immédiatement, avec une grande approximation, des règles très simples que nous allons indiquer.

152. Considérons d'abord le cas où le rayon incident est perpendiculaire à la surface réfléchissante, et supposons que ce rayon, étant simple, émane d'un foyer de lumière placé à une distance très considérable de la surface ; enfin supposons ce rayon transmis au second milieu, à travers une fente très étroite, dont les bords soient parallèles à l'axe des z. Si l'on mesure l'intensité de la lumière transmise dans un plan perpendiculaire à cet axe, et à une

distance donnée de la surface, cette intensité présentera divers maxima et minima correspondants à divers points; et chacun de ces points, quand on fera varier la distance à la surface, se mouvra, comme l'a dit Fresnel, sur une hyperbole sensiblement réduite, dans le cas présent, à une parabole; d'ailleurs cette parabole aura pour axe, comme l'on sait, la direction des rayons transmis, et pour sommet le bord de la fente. Mais ce qui n'avait pas encore été remarqué, et ce qui résulte immédiatement des formules de M. Cauchy, c'est que les paramètres des diverses paraboles correspondantes aux diverses franges se réduisent, à très peu près, aux divers termes d'une progression arithmétique, dont la raison est la longueur d'une ondulation lumineuse, le premier terme étant les trois quarts de cette longueur même. Calculées d'après cette règle, les racines carrées des rapports existant entre les paramètres doublés et la longueur d'une ondulation seront respectivement pour les paraboles correspondantes aux maxima d'intensité de la lumière :

$$\sqrt{1,5}=1,22,\ \sqrt{5,5}=2,3452,\ \sqrt{9,5}=3,8022,\ \sqrt{13,5}=3,6742$$
$$\sqrt{17,5}=4,1833,\ \sqrt{21,5}=4,6368,\ \sqrt{25,5}=5,0948,\ \text{etc.}$$

et pour les paraboles correspondantes aux minima d'intensité de la lumière :

$$\sqrt{3,5}=1,871,\ \sqrt{7,5}=2,7386,\ \sqrt{11,5}=3,3912,\ \sqrt{15,5}=3,9370$$
$$\sqrt{19,5}=4,4159,\ \sqrt{23,5}=4,8477,\ \sqrt{27,5}=5,2440,\ \text{etc.}$$

A la place des nombres que nous venons d'obtenir, Fresnel a trouvé les suivants :

1,2172, 2,3449, 3,8020, 3,6742, 4,1832, 4,6069, 5,0500, etc.
1,8726, 2,7392, 3,3913, 3,9372, 4,4160, 4,8479, 5,2442, etc.

qui diffèrent très peu des premiers, et qu'il a déterminés par un assez long calcul, en formant une table avec les diverses valeurs d'une certaine intégrale définie. Quant à l'amplitude des vibrations moléculaires, si on la représente par l'unité au moment où le rayon transmis commence à pénétrer dans le second milieu, elle se trouvera augmentée ou diminuée, sur chaque parabole, d'une quantité sensiblement égale au nombre inverse de celui qui exprime la circonférence du cercle dont le rayon aurait pour mesure la racine

carrée du rapport entre le paramètre de la parabole et la longueur d'une ondulation.

153. Les règles que nous venons d'énoncer ne sont pas seulement applicables aux rayons transmis; le calcul prouve qu'elles s'appliquent pareillement aux rayons réfléchis et diffractés. Il prouve aussi qu'à une distance infiniment petite de la surface réfléchissante, l'intensité de la lumière, dans les rayons transmis et réfléchis, est sensiblement celle que l'on obtiendrait si, l'écran venant à disparaître, il n'y avait pas de diffraction. Il prouve enfin que, si le rayon incident est polarisé rectilignement suivant un certain plan, les rayons diffractés, transmis ou réfléchis, seront polarisés suivant ce même plan.

Lorsque la nature du second milieu devient identique avec celle du premier, alors près de la surface réfléchissante, l'intensité de la lumière transmise se confond avec l'intensité de la lumière incidente, et le rayon réfléchi subsiste encore, avec cette circonstance remarquable que les diverses paraboles correspondent, non pas à des intensités diverses de la lumière réfléchie, mais seulement à des changements de phase. Toutefois, comme l'intensité de la lumière réfléchie est alors de l'ordre des termes que l'on négligeait dans le cas où les deux milieux étaient de nature différente; comme d'ailleurs ces termes peuvent être effectivement négligés, si la vitesse de propagation des vibrations transversales n'est pas très petite par rapport à la vitesse de propagation des vibrations longitudinales, il en résulte que, hors ce dernier cas, les rayons réfléchis diffractés sous l'incidence perpendiculaire seront du nombre de ceux qu'il sera très difficile d'apercevoir. Si les rayons dont il s'agit ici pouvaient être facilement rendus sensibles dans un milieu donné, ce serait une preuve que dans ce milieu le rapport entre les vitesses de propagation des vibrations transversales et longitudinales est très petit.

154. Jusqu'à présent nous avons supposé que le rayon incident était normal à la surface réfléchissante. Supposons maintenant qu'il s'incline sur cette surface, et forme avec la perpendiculaire à la surface un angle très petit, alors, dans chaque parabole, la corde ou section rectiligne, faite par un plan parallèle à la surface, décroîtra proportionnellement au cosinus de l'angle d'incidence, et en

même temps le milieu de cette corde, primitivement situé sur la direction naturelle du rayon réfracté, suivra ce rayon, tandis qu'il s'inclinera par rapport à la surface réfléchissante. Par suite, chaque parabole se transformera en une autre parabole, qui sera encore tangente à la surface réfléchissante, et qui aura pour axe une droite parallèle à la direction naturelle du rayon réfracté.

155. M. Cauchy a donc déduit de sa théorie mathématique deux conclusions très remarquables et entièrement nouvelles. La première, qui serait constatée, comme on l'a vu, par une ancienne expérience de MM. Arago et Fresnel, c'est que les rayons réfléchis sont diffractés, tout comme les rayons transmis. La seconde, c'est que dans un rayon simple, transmis ou réfléchi suivant une direction perpendiculaire à la surface de séparation des deux milieux, les paramètres des diverses paraboles, correspondantes aux points où l'intensité de la lumière devient un maximum ou minimum, forment à très peu près une progression arithmétique, dont la raison ou différence est la longueur d'une ondulation lumineuse.

Ce qu'il y a de plus remarquable, c'est que son analyse ne s'applique pas seulement à la théorie des ombres et de la diffraction des rayons lumineux; elle s'applique généralement à la propagation des mouvements infiniment petits, transmis d'un milieu dans un autre à travers une portion de surface plane, et prouve que les lois générales de cette transmission doivent rester les mêmes, quelle que soit la nature des phénomènes que ces mouvements produisent. Ainsi, par exemple, il résulte de sa théorie que les ondes sonores doivent être, tout comme les ondes lumineuses, non seulement réfléchies, mais encore réfractées, quand elles viennent à rencontrer la surface de séparation de deux milieux. Il y a plus : si le son est transmis à travers une ouverture pratiquée dans une cloison très mince, qui sépare l'une de l'autre deux portions d'un même milieu, les ondes sonores transmises devront être des ondes diffractées, dans lesquelles l'intensité du son, mesurée à une distance donnée de la surface de la cloison, offrira des maxima et des minima correspondants à divers points de l'espace. Si les ondes sonores qui rencontrent la cloison émanent d'une source placée à une très grande distance, et si d'ailleurs l'ouverture qui leur livre passage se réduit à une fente verticale, alors dans chaque plan ho-

rizontal les points correspondants aux plus grandes et aux moindres intensités du son se trouveront situés, à très peu près, sur diverses paraboles, dont les paramètres formeront une progression arithmétique qui aura pour raison l'épaisseur d'une onde sonore. A la vérité, ces conséquences de l'analyse doivent paraître au premier abord d'autant plus extraordinaires, qu'une différence bien marquée semble exister entre les phénomènes que produit d'une part la transmission de la lumière à travers les fentes d'un volet, d'autre part la transmission du son à travers une ouverture pratiquée dans une cloison ou dans une muraille. En effet, sans qu'il soit nécessaire de recourir à des expériences délicates, l'observateur le moins exercé reconnaîtra sans peine que derrière une cloison, et tout près de cette cloison même, les sons peuvent être perçus par l'oreille à des distances considérables de l'ouverture par laquelle ils sont transmis, tandis qu'un rayon de lumière, passant à travers une fente, devient insensible pour l'œil à une petite distance de l'axe de ce rayon. Toutefois l'accord qui a subsisté jusqu'ici entre les résultats de l'observation et les conclusions tirées des formules de M. Cauchy nous donne la ferme confiance que cette fois encore l'expérience viendra confirmer les prévisions de la théorie. Déjà même l'analyse explique la différence capitale que nous signalions tout-à-l'heure entre les phénomènes produits par la transmission de la lumière et des sons à travers une petite ouverture. Cette différence cessera de nous étonner, si nous comparons les épaisseurs des ondes sonores aux épaisseurs des ondes lumineuses; car, tandis que l'épaisseur d'une onde lumineuse varie entre des limites très resserrées, sensiblement représentées, pour les rayons que l'œil aperçoit, par le tiers et par les deux tiers de la millième partie d'un millimètre, l'épaisseur d'une onde sonore, pour les sons perçus par l'oreille, ne s'abaisse jamais au-dessous de 2 centimètres, et peut s'élever à plusieurs mètres. Par suite, chacune des paraboles qui correspondront aux plus grandes et aux moindres intensités de la lumière dans un rayon diffracté, offrira un très petit paramètre, et s'écartera très peu de l'axe de ce rayon. Mais on ne pourra plus en dire autant des paraboles, qui dans les ondes sonores et diffractées correspondront aux plus grandes et aux moindres intensités du son. Ces dernières paraboles, qui se-

ront encore tangentes à la surface de la cloison, à travers laquelle le mouvement est transmis par une fente, offriront au contraire des paramètres sensibles, qui pourront s'élever à plusieurs mètres, et en conséquence le son pourra s'entendre derrière la cloison, et assez près de cette cloison même, à de grandes distances de la fente. Il est toutefois une observation essentielle que nous devons faire : c'est que, si divers sons, les uns plus graves, les autres plus aigus, mais d'égale intensité, sont transmis successivement ou simultanément à travers une même ouverture pratiquée dans une cloison, les sons aigus seront ceux qui s'éteindront le plus rapidement, à mesure que l'on s'éloignera de l'ouverture dans un plan parallèle à la surface de la cloison. Il pourra même y avoir à cet égard entre les divers sons une différence très marquée; car si l'on prend pour mesure de l'intensité du son le carré de l'amplitude des vibrations moléculaires, cette intensité, mesurée dans les ondes diffractées et dans un plan parallèle à la cloison à de très grandes distances de l'ouverture, sera sensiblement proportionnelle à l'épaisseur de ces mêmes ondes.

156. Si la même analyse s'applique à la théorie des ondes sonores et à la théorie des ondes lumineuses, cela tient à ce que les unes et les autres peuvent être considérées comme produites par des mouvements de vibration infiniment petits, qui se propagent à travers des systèmes de molécules sollicitées par des forces d'attraction ou de répulsion mutuelle. Ces systèmes de molécules sont, dans la théorie du son, les corps solides, ou liquides, ou gazeux; dans la théorie de la lumière, le fluide lumineux, souvent désigné sous le nom d'éther. Dans l'une ou l'autre théorie, un mouvement infiniment petit quelconque peut toujours être censé résulter de la superposition d'un nombre fini ou infini de mouvements simples, c'est-à-dire de mouvements périodiques et propagés par des ondes planes; dans l'une et l'autre théorie, la superposition de deux mouvements simples peut ou rendre les phénomènes plus sensibles, ou les faire disparaître, soit en partie, soit même en totalité, suivant que les impressions reçues par l'œil ou par l'oreille, en vertu des deux mouvements dont il s'agit, s'ajoutent ou se neutralisent réciproquement. Dans l'une et l'autre théorie, un mouvement simple, en partie intercepté par une surface plane et transmis d'un milieu dans un autre à travers

une portion de cette surface, donne naissance à des phénomènes dignes de l'attention des physiciens. Nous avons déjà remarqué que si un rayon lumineux, transmis d'un milieu dans un autre à travers une ouverture pratiquée dans un écran, se transforme en un filet de lumière; si, d'autre part, les ondes sonores semblent s'épanouir derrière une cloison dans laquelle se trouve une fente qui leur livre passage, il suffit, pour expliquer ce contraste, de songer que l'épaisseur moyenne des ondes lumineuses se réduit à environ un demi-millième de millimètre, tandis que l'épaisseur des ondes sonores peut s'élever à plusieurs mètres. Mais ce n'est pas seulement par la longueur d'ondulation que les ondes sonores se distinguent des ondes lumineuses. Le caractère le plus saillant qui les distingue les unes des autres parait à M. Cauchy être la nature même du phénomène qui devient sensible aux yeux ou à l'oreille de l'observateur. Ce phénomène parait être, dans la théorie de la lumière, les vibrations transversales du fluide éthéré, c'est-à-dire les vibrations exécutées par les molécules d'éther perpendiculairement aux directions des rayons lumineux, et dans la théorie du son, la condensation ou la dilatation produite en chaque point par les vibrations de l'air ou du fluide élastique dans lequel l'observateur est placé. Cela posé, si deux mouvements simples, par exemple un mouvement incident et un mouvement réfléchi, se propagent en sens contraire dans le même milieu, chacun de ces deux mouvements, dans la théorie de la lumière, pourra être séparément perçu par l'œil, et l'observateur apercevra seulement ou le rayon incident ou le rayon réfléchi, suivant qu'il se tournera dans un sens ou dans un autre. Au contraire, dans la théorie du son, l'oreille sera sensible à la condensation ou à la pilatation résultante de la superposition des deux mouvements dont il s'agit; et comme ces deux mouvements pourront se neutraliser constamment en certains points de l'espace, il s'ensuit que, dans la théorie du son, les ondes sonores pourront, comme le prouve l'expérience, offrir ce qu'on nomme des nœuds fixes, bien différents des nœuds que présente un rayon simple de lumière, et qui sont toujours des nœuds mobiles. C'est aux nœuds fixes dont nous venons de parler que paraissent se rapporter les expériences exécutées par M. Savart dans le grand amphithéâtre du Collége de

France. En faisant résonner dans cet amphithéâtre un énorme timbre muni d'un tube renforçant, on déterminait par l'observation des séries de nœuds ou de points tels que si on y plaçait l'oreille on n'entendait aucun son, que le sable jeté sur une membrane restait tout-à-fait en repos. En observant les phénomènes produits par la réflexion du son, M. N. Savart a retrouvé des nœuds de la même espèce, qu'il a considérés avec raison comme résultant de l'interférence des ondes incidentes et des ondes réfléchies. Il y a plus : la superposition de plusieurs systèmes d'ondes sonores, en affaiblissant ou réduisant même à zéro l'intensité du son dans certains point de l'espace, l'augmente nécessairement en d'autres points, d'autant plus que le nombre des systèmes d'ondes superposés est plus considérable ; et c'est ainsi que le son se trouve renforcé par la présence d'un ou de plusieurs obstacles, dont les surfaces intérieures peuvent le réfléchir. Enfin, il est important d'observer que, dans la théorie du son telle que nous venons de l'admettre, le calcul s'accorde assez bien avec l'expérience, relativement aux places que doivent occuper les nœuds fixes produits par l'interférence des ondes incidentes et réfléchies. Ces nœuds, comme l'a reconnu M. N. Savart, se trouvent situés à égales distances les uns des autres : nous dirons ailleurs pourquoi la distance du premier nœud à la surface réfléchissante n'était que la moitié de ce qu'elle aurait dû être.

Couleurs des plaques minces. — 148. Boyle paraît être le premier qui ait observé avec une intention scientifique les couleurs des lames minces ; il réunit, comme cas particuliers d'un même ordre de phénomènes, les couleurs offertes par les bulles de savon, les huiles essentielles, le verre et l'acier recuits à divers degrés, etc. Après lui, Hooke reconnut la disposition de ces couleurs en anneaux concentriques, offrant une succession identique avec celle des couleurs de l'arc-en-ciel, le déplacement des anneaux sous l'influence d'une pression plus grande, etc., etc.

Ces couleurs apparaissent partout où un corps transparent est réduit à des lames d'une épaisseur très petite : on peut en soufflant le verre réduire assez son épaisseur pour que ce phénomène se produise ; mais il est bien plus facile à réaliser avec des lames de mica et autres substances minérales diaphanes douées d'une structure

lamellaire. Il est surtout rendu manifeste à nos yeux par l'écume des liquides, parce que l'enveloppe fluide des bulles dont se compose cette écume est extrêmement mince.

Ces couleurs varient avec l'épaisseur de la lame solide ou de la couche liquide, et disparaissent quand cette épaisseur dépasse certaines limites : si elle est trop grande, toutes les couleurs sont également réfléchies, la lumière réfléchie est dès lors blanche ; si, au contraire, l'épaisseur est trop petite, aucun rayon réfléchi ne parvient à l'œil, la surface apparaît complétement noire. Ce fait peut être mis en évidence à l'aide de simples bulles de savon mises à l'abri des agitations de l'air. Si l'on plonge rapidement l'orifice d'un verre à boire dans de l'eau rendue quelque peu visqueuse par une solution de savon, la couche aqueuse qui le recouvre donnera naissance à la succession de phénomènes que nous venons de rappeler. Si on la regarde en la maintenant dans un plan vertical, on la verra d'abord uniformément blanche sur toute sa surface ; mais lorsqu'elle devient plus mince par la précipitation des molécules d'eau, on voit apparaître des couleurs qui se disposent en bandes horizontales, et deviennent de plus en plus brillantes, à mesure que l'épaisseur de la couche diminue, jusqu'à ce qu'enfin cette épaisseur soit assez petite, car alors la partie supérieure de la couche devient complétement noire : la cohésion des molécules n'est plus assez grande pour résister aux autres forces qui tendent à les séparer ; la couche se rompt et disparaît.

On observe le même phénomène quand on dépose une goutte d'huile sur la surface d'une eau tranquille. Cette huile s'étend rapidement, et forme bientôt une couche assez mince pour donner naissance aux plus belles couleurs.

Il n'est personne qui n'ait remarqué que l'acier ou d'autres métaux polis présentent, lorsqu'on les expose à l'air, une certaine succession de teintes dues aux petites couches d'oxide qui se forment à leur surface d'autant plus rapidement que la température du métal est plus élevée. Ces couleurs sont liées d'une manière si invariable avec l'épaisseur des couches d'oxide, cette épaisseur dépend elle-même si uniquement de la température, que les ouvriers exercés concluent habituellement le degré de chaleur

de la nuance de la couleur. On dit ainsi, par exemple, que l'acier a subi la chaleur violette, la chaleur bleue...

Une couche ou lame d'air et même une lame de vide, si l'on peut s'exprimer ainsi, suffisent à produire ce phénomène dans tout son éclat. Si l'on presse l'une contre l'autre à l'aide des doigts deux plaques de verre, on voit autour du point de contact une série de bandes ou anneaux teints de couleurs brillantes, et qui se dilatent à mesure que l'on réduit par une plus grande pression l'espace compris entre les plaques.

158. Pour observer ces phénomènes avec ordre et de telle sorte que nous en puissions découvrir les lois, nous adopterons le mode d'expérimentation proposé par Newton. Ce grand homme, *en concentrant sur ces phénomènes et son incomparable sagacité expérimentale et son génie inventif, fit faire à cette belle partie de l'optique un de ces pas de géant qui seraient le prix d'un siècle d'études ordinaires* (1). Newton posa simplement un verre biconvexe sphérique sur un verre plan. L'épaisseur de la lame d'air croissait proportionnellement au carré de la distance du point que l'on considère au point de contact, et se trouvait par conséquent la même à une même distance de ce point. Dès lors, puisque la couleur réfléchie dépend uniquement de cette épaisseur, les bandes de couleurs homogènes devaient se disposer en anneaux circulaires ayant ce même point pour centre.

On retrouve la même succession de couleur, quel que soit le fluide transparent compris entre les deux plaques; mais toutefois les couleurs sont d'autant plus vives que le pouvoir réfringent de la plaque de verre diffère davantage du pouvoir réfringent de la couche fluide.

Si l'on regarde attentivement et toujours sous le même angle cette série d'anneaux, on voit que la partie centrale est, non un anneau, mais un cercle entier, de couleur uniforme, qui se dilate de plus en plus, et se trouve bientôt remplacé par un nouveau cercle de couleur différente, quand on diminue l'épaisseur de la couche fluide en pressant davantage les deux plaques l'une contre l'autre.

(1) Félix Billet, thèse de physique sur les anneaux colorés. Paris, 1833.

Ce second cercle se dilate à son tour et cède sa place à un troisième, si le contact devient encore plus intime; jusqu'à ce qu'enfin une tache noire vienne occuper invariablement le centre du système d'anneaux. La lame d'air est alors si mince qu'elle ne réfléchit plus aucune couleur : le phénomène est complet, et l'on découvre autour de la tache noire sept anneaux distincts présentant chacun un certain ordre de couleurs. Cette observation a amené Newton à distinguer des couleurs de divers ordres. Ainsi le rouge du troisième ordre est celui que l'on trouve dans le troisième anneau à partir du centre noir. La série entière de toutes les couleurs forme ce qu'on appelle l'échelle des couleur de Newton.

159. Les lois fondamentales des phénomènes que nous venons de décrire sont renfermées dans les propositions suivantes :

I. Avec la lumière homogène les anneaux sont alternativement colorés et noirs. Les épaisseurs correspondantes des anneaux de divers ordres brillants ou obscurs sont représentées, pour les anneaux brillants par les nombres impairs, pour les anneaux noirs par les nombres pairs de la série naturelle des nombres.

II. L'épaisseur correspondante à un anneau d'ordre donné varie avec la couleur de la lumière. Elle est la plus grande possible avec la lumière rouge, la plus petite avec la lumière violette; elle a une valeur moyenne avec les rayons de moyenne réfrangibilité. Dans la lumière blanche par conséquent, ou plus généralement dans la lumière composée, chaque anneau est formé d'un certain nombre d'anneaux de couleurs différentes, se succédant l'une à l'autre dans l'ordre de leur réfrangibilité.

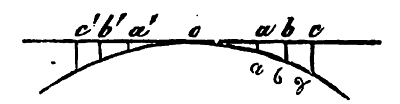
III. L'épaisseur correspondante à un anneau d'ordre donné varie avec l'obliquité, et est sensiblement proportionnelle à la sécante de l'angle d'incidence.

IV. L'épaisseur correspondante à un anneau d'ordre donné varie avec la substance de la plaque réfléchissante, en raison inverse de l'indice de réfraction de cette plaque.

160. Pour établir la première de ces lois, il faut employer de la lumière homogène. On peut l'emprunter au spectre produit par un prisme, ou mieux encore, suivant la méthode de M. Talbot, à une lampe brûlant de l'alcool salé. La lumière d'une semblable lampe a une couleur jaune parfaitement homogène, et qu'on n'a pu dé-

composer par aucun moyen. Si on s'en sert pour éclairer les plaques pressées l'une contre l'autre, les anneaux colorés obtenus sont tour à tour noirs et jaunes, et leur nombre est si grand qu'on essaierait en vain de les compter.

Il est très facile de démontrer la loi relative aux épaisseurs correspondantes des anneaux successifs. Soit *o* le point de contact



des deux surfaces plane et sphérique, et *aa'*, *bb'*, *cc'*, les diamètres des anneaux successifs qui ont ce point pour centre. Il est évident que les épaisseurs $a\alpha$, $b6$, $c\gamma$,... de la couche d'air aux points où les anneaux sont formés, sont proportionnelles aux carrés des distances *oa*, *ob*, *oc*,... ou aux carrés des diamètres des anneaux, de sorte que pour déterminer la loi des épaisseurs, il suffit de mesurer ces diamètres. Newton le fit avec beaucoup de soin, et trouva que les carrés des diamètres et par suite les épaisseurs formaient une progression arithmétique. Ce n'était pas assez : il voulut obtenir la valeur absolue de chacune de ces épaisseurs. Il lui suffisait pour cela, en s'appuyant sur la loi d'abord reconnue par lui, de mesurer directement l'épaisseur de la couche correspondante à un anneau d'ordre quelconque. Il choisit pour cet effet l'anneau obscur du cinquième ordre. Son épaisseur dépend de deux éléments, du rayon de l'anneau et du diamètre de la lentille sphérique : elle est égale au quotient que l'on obtient quand on divise le carré du rayon par le diamètre. Newton n'avait donc que deux mesures à prendre : il les prit, et déduisit de son calcul, après avoir fait toutes les corrections nécessaires, que cette épaisseur était égale à 1/17800e de pouce anglais. L'épaisseur du premier anneau brillant, dix fois plus petite que celle de l'anneau sombre du cinquième ordre, était donc égale à 1/178000e de pouce anglais, de sorte que les épaisseurs correspondantes aux rayons de divers ordres sont pour les anneaux brillants :

$$\frac{1}{178000}, \quad \frac{3}{178000}, \quad \frac{5}{178000}, \quad \frac{7}{178000} \cdots$$

pour les anneaux noirs intermédiaires :

$$\frac{2}{178000}, \quad \frac{4}{178000}, \quad \frac{5}{178000} \ldots$$

Ces nombres sont relatifs aux rayons les plus lumineux du spectre, c'est-à-dire à ceux qui correspondent aux limites de l'orangé et du jaune.

Pour mettre en évidence la variation que subissent, quand la couleur change, les diamètres des anneaux, et par suite les épaisseurs des couches d'air correspondantes, il suffit d'éclairer les verres avec diverses parties du spectre solaire, ou plus simplement de regarder les anneaux produits à travers des verres colorés. On verra de cette manière que les anneaux sont d'autant plus grands que l'indice de réfrangibilité de la lumière employée est plus petit.

Quand cette loi est une fois démontrée, on s'explique facilement la succession de couleurs observée dans chaque anneau, lorsque la lumière employée est blanche ou composée ; car les anneaux dans ce cas résultent d'une superposition de bandes circulaires diversement colorées ; et comme les anneaux composants sont tous de grandeurs différentes, l'anneau résultant est lui-même formé de diverses couleurs, dont les plus réfrangibles occupent les bords intérieurs, et les moins réfrangibles les bords extérieurs. Il est aussi facile de comprendre dans cette théorie que les couleurs des anneaux successifs doivent s'altérer et disparaître, parce que les bandes colorées de différents ordres finissent bientôt par se superposer et se confondre.

Il suffit d'abaisser l'œil pour s'assurer que la grandeur des anneaux varie avec l'obliquité de la lumière incidente ; on voit les anneaux se dilater rapidement à mesure que l'obliquité du faisceau réfléchi augmente. L'épaisseur de la couche d'air à laquelle ces anneaux se manifestent est d'ailleurs sensiblement proportionnelle à la sécante de l'angle d'incidence ou de réflexion.

La quatrième et dernière loi, qui exprime la liaison ou dépendance qui existe entre l'épaisseur correspondante à chaque anneau et le pouvoir réfringent de la couche, se vérifie aisément par la simple introduction d'une goutte d'eau entre les verres : on voit, en effet, de cette manière, les anneaux se contracter. Si l'on compare

leurs diamètres dans l'eau et dans l'air, on en conclut immédiatement que les épaisseurs correspondantes des deux couches sont entre elles comme 4 est à 3, c'est-à-dire en raison inverse des indices de réfraction.

161. Nous n'avons parlé jusqu'ici que des anneaux réfléchis; il existe cependant un autre système beaucoup plus pâle d'anneaux formés par transmission, et qui suivent les mêmes lois que les anneaux observés par réflexion, avec cette exception remarquable que la couleur de l'anneau transmis, qui correspond à une épaisseur donnée quelconque, est toujours complémentaire de la couleur de l'anneau réfléchi qui répond à la même épaisseur; de sorte que dans la lumière homogène l'anneau brillant transmis est toujours à la même distance du centre que l'anneau obscur correspondant du système réfléchi.

162. Arrivons maintenant à l'explication physique des phénomènes. Nous avons déjà dit que Newton inventa, pour les expliquer, sa théorie trop célèbre des accès de facile et difficile transmission. Le rayon lumineux est dans un accès de facile transmission quand il traverse la première surface; cet accès de facile transmission est remplacé par un accès de facile réflexion, et ainsi successivement. Les espaces parcourus par le rayon pendant la durée des accès sont d'ailleurs toujours égaux et constituent ce qu'on peut appeler la longueur des accès. En arrivant à la seconde surface, le rayon sera donc dans un accès de facile transmission ou de facile réflexion suivant que l'intervalle qui sépare les surfaces ou l'épaisseur de la lame fluide sera un multiple pair ou impair de la longueur des accès. Ainsi se trouverait, dit-on, expliquée d'une manière satisfaisante cette succession d'anneaux alternativement brillants et obscurs, et la progression arithmétique des épaisseurs correspondantes à ces anneaux.

Pour rendre compte de la seconde loi, il fallait supposer que la longueur des accès varie avec la couleur de la lumière, qu'elle atteint son maximum dans la lumière rouge, son minimum dans la lumière violette, qu'elle a une valeur moyenne pour les rayons de moyenne réfrangibilité. Newton détermina la longueur absolue de ces accès pour les rayons de chaque couleur simple, et trouva que es nombres qui les représentent ont une relation remarquable avec

les nombres qui expriment les longueurs des cordes vibrantes qui ont tour à tour pour son fondamental les sept notes de la gamme. Les résultats auxquels il est parvenu sont encore considérés aujourd'hui comme une des données les plus importantes de l'optique.

Restaient encore deux lois dont il fallait rendre compte, et Newton, malheureusement, ne put le faire qu'en attribuant aux accès des propriétés tout-à-fait incompatibles avec les diverses hypothèses physiques par lesquelles on a essayé de s'en faire une idée. Ainsi, pour expliquer la dilatation que subissent les anneaux quand l'obliquité du rayon augmente, Newton admit que la longueur des accès augmentait avec l'angle d'incidence, proportionnellement à la sécante de cet angle. Cette supposition est en contradiction absolue avec toute théorie physique. Et, en effet, si les accès ont pour cause les vibrations d'un certain fluide éthéré, vibrations qui se propageraient avec une vitesse plus grande que celle des molécules lumineuses, et qui, dans leur mouvement progressif, seraient tantôt en accord, tantôt en opposition, les longueurs des accès seraient invariablement les mêmes dans un même milieu, quelle que fût l'incidence.

Il était non moins impossible, dans les idées de Newton, de concilier la quatrième loi avec la théorie. Les épaisseurs de couche de divers milieux correspondantes à une même teinte, étant en raison inverse des indices de réfraction, il fallait supposer que la longueur des accès variait dans la même proportion; et puisque dans la théorie de Newton les indices de réfraction sont directement proportionnels aux vitesses de proportion, il en résultait que lorsque les vitesses augmentaient dans une certaine progression, les espaces parcourus par le rayon dans l'intervalle qui sépare un accès de facile transmission d'un accès de facile réflexion, devaient nécessairement diminuer dans la même proportion.

Il semble que Newton ait regardé cette supposition comme l'expression vraie d'un fait existant, et l'on a longtemps attribué à la lumière la propriété que nous venons d'énoncer.

163. On ne peut nier que lorsque l'épaisseur de la couche croît, la lumière apparaît alternativement réfléchie et transmise, et qu'il n'est pas un instant dans lequel on puisse dire lequel de ces deux états est son état actuel. Mais si nous approfondissons la théorie de

Newton, nous verrons qu'il admettait que ces apparences alternatives de la lumière dans les rayons réfléchis et transmis étaient l'effet de la réflexion et de la transmission produite sur une seule et même surface, la seconde surface de la couche fluide. Or, aucune de ces suppositions n'est vraie. Nous allons prouver non seulement qu'il n'y a à cette surface aucune alternative de transmission et de réflexion, et que la lumière y est toujours réfléchie, mais de plus que la lumière est aussi réfléchie à la première surface, et que cette réflexion joue un rôle important dans le phénomène produit.

En effet, au lieu de lumière ordinaire employons de la lumière polarisée perpendiculairement au plan d'incidence; l'intensité de la lumière dans les anneaux transmis ou réfléchis varie dans ce cas avec l'incidence, et ces anneaux s'évanouissent en même temps lorsque la lumière tombe sous un certain angle, qui est l'angle de polarisation de verre. Le même phénomène se reproduit lorsque les anneaux sont formés par une couche renfermée entre une lentille de verre et un réflecteur métallique. Les anneaux disparaissent comme auparavant quand l'angle d'incidence est égal à l'angle de polarisation; on remarque toutefois dans ce cas une particularité remarquable, c'est que quand les anneaux reparaissent sous un angle plus grand que l'angle de polarisation, leurs intensités et leurs couleurs sont complémentaires de ce qu'elles étaient auparavant, de sorte que s'ils commençaient dans ce premier cas par un centre noir, ils ont pour point de départ dans le second un centre blanc.

Pour bien comprendre cette conclusion, il faut se rappeler que le rayon de lumière qui rencontre sous l'angle de polarisation une surface transparente quelconque est entièrement transmis et nullement réfléchi. Il n'en est pas ainsi des surfaces métalliques; et par conséquent, quoique, dans les conditions où nous nous sommes placés, la lumière ne soit pas réfléchie par la surface supérieure de la couche, comme elle l'est abondamment par la surface inférieure ou par la surface métallique, on ne voit pas pourquoi, dans la théorie de Newton, les anneaux ne continueraient pas à se former. Leur disparition dans de semblables circonstances prouve donc que la lumière réfléchie par la surface supérieure est essentielle à la production des phénomènes.

En discutant d'autres particularités de cette expérience, nous

verrons que la lumière réfléchie par la surface inférieure concourt elle-même essentiellement à la formation des anneaux, et nous arriverons ainsi à cette conclusion fondamentale, que le phénomène des anneaux résulte de l'union et de l'influence mutuelle des deux rayons réfléchis par les deux surfaces.

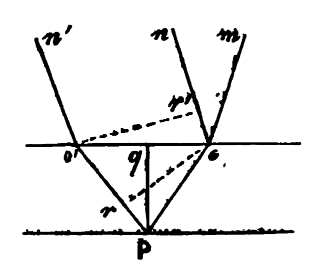
164. La lumière qui tombe sur la première surface de la couche est en partie réfléchie, en partie transmise. Cette dernière portion se subdivise encore à la rencontre de la seconde surface; une fraction de la lumière réfléchie par cette seconde surface traverse la première, parvient à l'œil en même temps que la portion primitivement réfléchie, interfère avec elle, et la renforce ou l'affaiblit vant qu'elle atteint l'œil dans une même phase ou dans une phase opposée.

La première idée de ce mode d'explication des phénomènes produits par les plaques minces appartient à Hooke; elle est clairement indiquée dans un curieux passage de sa *Micrographie*, ouvrage publié longtemps avant que Newton s'occupât de cette grande question. Hooke expose avec clarté de quelle manière les anneaux de divers ordres dépendent du retard subi par la seconde *pulsation* ou *onde* relativement à la première, et par conséquent de l'épaisseur de la plaque. Mais il ne semble pas s'être fait une idée juste et distincte du principe des interférences. La manière dont il conçoit que les diverses couleurs résultent de cette double pulsation ou onde est entièrement erronée.

Euler essaya le premier directement de lier les phénomènes des plaques minces à la théorie des ondulations de la lumière; mais cette tentative, comme presque toutes les études physiques de ce grand mathématicien, ne fut couronnée d'aucun succès.

165. Ce beau et difficile problème demeura insoluble jusqu'au moment où Young découvrit le principe des interférences : sa solution fut, au contraire, complète, lorsque ce principe si fécond vint se joindre à l'ingénieuse insinuation de Hooke. Soit $m\,o\,n$ la marche d'un rayon réfléchi par la première surface, $m\,o\,p\,o'\,n'$ celle d'un rayon réfléchi par la seconde surface et transmis de nouveau par la première. Abaissons des points o, o' deux perpendiculaires sur les deux rayons réfléchis $o\,n$, $o'p$; $o'\,r'$ sera aussi perpendiculaire à $o'\,n'$ et parallèle, par conséquent, au front des deux

ondes réfléchies. Concevons maintenant qu'une onde infléchie à la première surface dans la position $o' r'$ rencontre à cette même place



une onde précédemment réfléchie par la seconde surface, et calculons l'intervalle primitif qui les sépare. Pendant le temps qu'elles ont mis à atteindre la première surface, elles ont parcouru, l'une l'espace $o\,r'$, l'autre l'espace $op + po'$. Mais si, comme nous le supposons, $o\,r$ est perpendiculaire à $o'\,p$, il est évident, en vertu des lois de la réfraction, que les espaces $o\,r'$, $o'\,r$, sont parcourus dans le même temps dans ces deux milieux, et que par conséquent l'intervalle d'interférence est le temps employé à parcourir l'espace $op + pr$. On a d'ailleurs $p\,r = o\,p \cos o\,p\,r = op \cos^2 op\,q$, et par suite :

$$op + pr = op\,(1 + \cos 2\,op\,q) = 2\,op \cos^2 op\,q,$$

et parce que $op \cos op\,q = pq$,

$$op + pr = 2pq \cos op\,q.$$

Donc, si nous désignons par δ la différence des chemins parcourus, par e l'épaisseur $p\,q$ de la plaque, par θ l'angle $o\,p\,q$, on aura définitivement :

$$\delta = 2\,e \cos \theta.$$

Cela posé, les deux ondes, dont nous avons étudié la marche, seront en complet accord ou en complet désaccord, si la différence δ est un multiple exact de la demi-longueur d'onde λ, c'est-à-dire si l'on a $\delta = n\frac{\lambda}{2}$: en substituant cette valeur dans l'équation précédente, on a :

$$n\frac{\lambda}{2} = 2e \cos\theta, \quad e = \frac{1}{4} n\lambda \sec\theta.$$

Cette dernière formule détermine l'épaisseur e de la plaque, et nous apprend, 1° que les épaisseurs successives de la plaque, pour lesquelles la lumière réfléchie est un maximum ou un minimum, sont représentées par la série naturelle des nombres; 2° que pour diverses espèces de lumière ces épaisseurs sont proportionnelles à la longueur d'onde; 3° que pour différentes obliquités elles varient proportionnellement à la sécante de l'angle d'incidence sur le milieu extérieur; 4° enfin que pour des plaques de différentes substances, elles sont proportionnelles à λ, et par conséquent en raison directe de la vitesse de propagation, ou en raison inverse de l'indice de réfraction de la substance dont la couche est formée.

166. Il est dans cette explication un point qu'il importe de considérer particulièrement. Les deux ondes étant en complet accord lorsque la différence δ est un multiple pair de la demi-longueur d'onde, en complet désaccord lorsque δ est un multiple impair de cette même demi-longueur d'onde, il semblerait que les anneaux brillants doivent se former là où l'épaisseur est un multiple pair de la quantité $\frac{1}{4}\lambda \sec\theta$, et les anneaux obscurs là où e est un multiple impair de $\frac{1}{4}\lambda \sec\theta$. S'il en était ainsi, le point de contact serait pour les ondes un point de concordance, et les anneaux devraient partir d'un centre brillant, au lieu de commencer par un centre noir.

Cette contradiction apparente trouve son explication naturelle dans ce fait que les deux réflexions ont lieu sous des circonstances réellement différentes, que l'un des rayons est réfléchi à la surface d'un milieu plus dense, l'autre à la surface d'un milieu plus rare.

Un exemple bien simple fera ressortir l'effet que doit produire cette différence. Si une première bille élastique vient en frapper une seconde au repos, elle lui communique dans tous les cas une certaine quantité de mouvement; mais son état après le choc dépend du rapport des masses des deux billes. Si elles sont égales, la première bille restera en repos après le choc; si elles sont inégales, la première bille conservera une certaine vitesse dans la direction primitive ou dans une direction contraire, suivant que sa masse sera plus

grande ou plus petite que celle de la seconde bille. Ce fait nous aidera à comprendre ce qui se passe lorsqu'une onde atteint la surface de séparation des deux milieux. Les particules d'éther en contact avec cette surface communiquent le mouvement aux molécules adjacentes du second milieu en donnant naissance à une onde réfractée ; mais après cette communication, elles ne resteront en repos qu'autant que la densité et l'élasticité des deux milieux seront les mêmes. S'il n'en est pas ainsi, les particules du premier milieu continueront à se mouvoir en produisant une onde réfléchie. La réfraction est donc accompagnée de réflexion, et cette réflexion est d'autant plus intense que la différence entre les densités de l'éther dans les deux milieux est plus grande. Il résulte de ce que nous venons de dire que la direction de la vitesse propre des molécules du premier milieu après le mouvement communiqué aux molécules du second, sera différente suivant que l'éther dans le premier milieu sera plus dense ou plus rare. Dans le premier cas, la vibration moléculaire s'exécutera dans le même sens qu'avant, elle s'exécutera en sens contraire dans la seconde hypothèse. Il y aura donc dans tous les cas une onde réfléchie ; mais dans un cas l'onde réfléchie résultera de vibrations exécutées dans le même sens que celles qui donnaient naissance à l'onde incidente ; elle résultera dans le second cas de vibrations exécutées dans une direction opposée.

Le résultat de cette différence est évidemment le même que si l'un des systèmes d'onde avait gagné ou perdu une demi-ondulation ; en sorte que si les deux ondes réfléchies par les deux surfaces devaient s'accorder en raison de la différence qui existe entre les chemins parcourus, elles seront en plein désaccord par suite de cette nouvelle cause perturbatrice. Les anneaux obscurs se formeront donc là où l'épaisseur de la plaque est un multiple pair de la quantité $\frac{1}{4}\lambda \sec\theta$; les anneaux brillants correspondront aux multiples impairs. La théorie est ainsi réconciliée avec les faits.

167. Nous avons parlé d'une autre série d'anneaux visibles par transmission. Ils proviennent de l'interférence des rayons transmis directement avec les rayons qui ne sont transmis qu'après une double réflexion intérieure : il résulte des considérations précédentes qu'ils doivent être complémentaires des anneaux vus par réflexion, et c'est ce qui a lieu en effet ; il faut attribuer leur peu d'éclat à la

différence qui existe entre les intensités des rayons interférents.

168. La théorie des couleurs minces, telle qu'elle sortit des mains de Young, présentait un côté faible; elle a été perfectionnée depuis. Il est évident que les portions de lumière réfléchies par les surfaces supérieure et inférieure ne peuvent pas être égales, parce que la lumière qui arrive à la seconde surface est toujours affaiblie par la réflexion partielle qu'elle a subie à la première. Les deux rayons, par conséquent, ne devraient jamais se neutraliser pleinement par interférence; l'intensité de la lumière dans les anneaux obscurs ne devrait jamais s'évanouir entièrement; c'est ce qui arrive cependant quand on emploie de la lumière homogène. Poisson remarqua et combla le premier cette lacune de la théorie. Il est évident, en effet, qu'il y a dans l'intérieur de la couche une infinité de réflexions partielles, accompagnées chacune d'une transmission partielle, et que pour évaluer l'effet produit il faut tenir compte de toute cette série de réflexions, et non pas seulement de ses deux premiers termes. Quand on considère le problème sous ce point de vue plus général, on trouve que là où l'épaisseur de la couche fluide est un multiple exact de la demi-longueur d'onde, l'intensité des rayons réfléchis et transmis est tout-à-fait la même que si, la couche disparaissant tout-à-fait, les deux milieux qui la comprennent étaient amenés au contact; de sorte que si ces deux milieux sont doués du même pouvoir réfringent, la lumière réfléchie disparait tout-à-fait, tandis que la lumière transmise est égale a la lumière incidente.

169. Nous venons de toucher à un point capital, par rapport auquel les deux théories sont en complète opposition. Suivant toutes les deux, une certaine portion de lumière est réfléchie par la première surface de la couche. Dans la théorie de Newton, cette portion produit toujours son plein effet, et par conséquent il devrait y avoir dans les anneaux obscurs une quantité considérable de lumière. Dans la théorie des ondulations, au contraire, cette même portion est détruite à certains intervalles par l'interférence d'autres portions; et dans la lumière homogène les anneaux obscurs doivent être absolument noirs.

La dernière de ces conclusions semble s'accorder avec les phénomènes, tandis que la première est évidemment en désaccord avec

les faits. Fresnel l'a clairement démontré par une expérience ingénieuse. Il plaça un prisme sur une lentille dont on avait noirci la surface inférieure, et fit en sorte qu'une portion de la base du prisme s'étendît au-delà de la lentille. La lumière réfléchie par cette portion ne devait pas, suivant la théorie de Newton, surpasser en intensité celle des anneaux obscurs : or, tout procédé photométrique suffit à prouver que l'intensité de la lumière, dans les deux cas, est grandement différente, et à démontrer par conséquent que les anneaux obscurs ne sont pas produits, comme on le suppose dans l'hypothèse des accès, par la suppression de la seconde réflexion.

170. Pour expliquer la teinte centrale, et notamment la tache noire que l'on observe par réflexion au centre des anneaux formés entre deux verres, qui comprennent entre eux une lame d'air, comme aussi pour rendre raison des teintes complémentaires des anneaux réfléchis et transmis, nous avons admis que la réflexion à la seconde surface d'un milieu plus dense que l'air, diffère de la réflexion à la première surface par cette curieuse particularité, que le chemin parcouru par le rayon réfléchi à la première surface doit être considéré comme surpassant le chemin parcouru par un rayon réfléchi à la seconde surface, quelle que soit l'incidence, d'un certain excès précisément égal à la demi-longueur d'onde. M. Babinet est parvenu à mettre en évidence cette déduction de la théorie, expérimentalement et indépendamment de toute hypothèse sur la cause des phénomènes de coloration des plaques minces.

Il fait tomber sur une plaque épaisse, à faces parallèles, des rayons provenant d'une ouverture étroite, et séparés en deux faisceaux interférents par une plaque-prisme. La seconde surface de la plaque épaisse est étamée à moitié, en sorte que l'on peut opérer la réflexion sur la seconde surface, dans les trois cas suivants : 1° les deux faisceaux interférents sont réfléchis tous les deux par la seconde surface, dans la partie non étamée; 2° l'un des faisceaux se réfléchit sur la surface non étamée et l'autre sur la surface étamée; 3° tous les deux se réfléchissent sur la surface étamée. Le résultat de l'expérience est que, dans le premier et le troisième cas où les réflexions sont de même nature, c'est-à-dire de plus réfringent sur moins réfringent, ou de moins réfringent sur plus réfringent, la bande centrale des franges d'interférence est blanche, et les

rayons interférents d'accord, comme ayant parcouru des chemins égaux ; tandis que dans le second cas, où les deux réflexions sont de natures contraires, la bande centrale est noire ; de sorte que la perte d'un demi-intervalle d'interférence ou d'une demi-longueur d'onde, pour un des rayons, est évidente.

171. La théorie que nous venons de développer rendait nécessaire, sous des conditions données, l'existence des anneaux à centre blanc. Il suffisait pour les obtenir de faire que si la réflexion à la première surface a lieu d'un milieu moins réfringent sur un milieu plus réfringent, la réflexion à la seconde surface se fasse aussi d'un milieu moins réfringent sur un milieu plus réfringent. Young les réalisa le premier en interposant de l'huile de sassafras entre deux surfaces fortement pressées de flint-glass et de crown-glass. Pour jeter un nouveau jour sur cette question délicate et rendre la théorie tout-à-fait palpable, il fallait montrer que le centre de ces anneaux redevient noir dès que le liquide interposé a plus de réfringence que le flint ou le crown. M. Soleil a présenté tout récemment à l'Académie un appareil dont l'idée est due à M. Arago, et à l'aide duquel on exécute facilement cette belle expérience. L'appareil se compose d'un prisme de flint-glass, dont la base convexe appartient à une sphère d'environ 2^{m} de rayon ; cette base repose sur une lame de crown-glass parfaitement plane : le tout est reçu dans un cadre de cuivre ; et deux vis de pression agissant par l'intermédiaire d'un coussin en cuivre sur l'arête émoussée du prisme, amènent au contact les deux surfaces du verre.

Lorsque l'on mouille la surface du crown avec un liquide qui comme l'eau a moins de réfringence que les deux verres, les anneaux produits ont un centre noir, car il y a perte d'une demi-ondulation à la première surface du liquide.

Si au contraire on interpose un liquide plus réfringent que les deux verres, tel que l'huile de cassia, le centre des anneaux produits est encore noir; mais ici la perte d'ondulation se fait à la seconde surface du liquide.

Supposons maintenant qu'on introduise entre les deux verres un liquide moins réfringent que le flint-glass du prisme, mais plus réfringent que le crown-glass de la plaque inférieure, les anneaux produits auront un centre blanc. Dans ce cas, facile à réaliser avec

l'huile essentielle de girofle, les rayons réfléchis à la première surface de la couche liquide éprouveront un changement de phase, mais les rayons réfléchis à la seconde surface éprouveront un changement tout-à-fait semblable; en sorte que les uns et les autres venant à se rencontrer après la réflexion, n'auront pas cessé de s'accorder; ils s'ajouteront au lieu de s'entre-détruire, et produiront un centre blanc au lieu d'un centre noir dans les anneaux.

Il est presque superflu de dire que, dans ces deux cas, ceux-ci seront teints de couleurs complémentaires.

M. Soleil, d'après les conseils de M. Babinet, a remplacé dans ce premier appareil la plaque plane, homogène, par une autre plaque formée de deux portions égales : l'une de flint-glass, comme le prisme, l'autre de crown-glass. En interposant de l'huile de girofle entre le prisme et la double plaque, on obtient des anneaux dont la portion correspondante à la lame de crown est à centre blanc, tandis que l'autre moitié, celle qui correspond à la plaque de flint, est à centre noir. On aperçoit aussi l'inégalité de diamètre et la différence de teintes des deux systèmes.

On aurait pu craindre que l'imperfection du travail des deux plaques ne leur fît simuler la production du double système, sans qu'il y eût aucun liquide interposé; car, dans la formation ordinaire des anneaux colorés, on a fréquemment observé que l'apparition de la tache centrale noire est précédée de celle d'une tache blanche, résultant de ce que la lame d'air au centre a encore un excès d'épaisseur. Les expériences faites par M. Soleil ont dissipé complétement ces craintes.

En projetant les anneaux sur un écran, ce qui s'exécute avec la plus grande facilité, on voit que sous la même incidence la partie du champ qui contient les demi-anneaux à centre noir est beaucoup plus illuminée que celles qu'occupent les demi-anneaux à centre blanc.

M. Soleil fait observer que le flint de Guinand est un peu trop réfringent pour pouvoir être employé à la confection de ses appareils; il a dû faire usage du flint ancien, ou à défaut de celui-là, du flint de Choisy-le-Roi; quant au crown, celui de Saint-Gobin lui a donné de très beaux résultats.

172. M. Soleil, artiste infatigable, qui s'est consacré tout en-

tier à la construction des instruments d'optique, a vainement essayé d'obtenir des anneaux à centre parfaitement noir ou blanc, en prenant pour seconde surface réfléchissante un métal ou une substance ayant l'éclat métallique. Cette impossibilité, qui n'est énoncée nulle part, est pour moi un fait depuis longtemps connu; le centre des anneaux ainsi obtenus est essentiellement gris. M. Cauchy l'a démontré mathématiquement il y a plusieurs années. Je regrette vivement que l'illustre géomètre n'ait pas encore publié le calcul si élégant de tous les phénomènes relatifs aux couleurs des plaques minces : c'est sans contredit une des plus heureuses applications de sa grande théorie.

M. Cauchy avait fait ressortir, à l'aide de ces formules, toutes les particularités importantes que M. Arago a déduites des plus ingénieuses expériences, et que nous allons décrire.

173. A l'époque où Newton termina son travail sur les anneaux colorés, ce sujet, dit M. Billet, paraissait épuisé, et il l'était, en effet, à ne considérer que l'état de la science d'alors. Mais une découverte moderne, celle de la polarisation, ayant créé une nouvelle optique plus vaste que l'ancienne, il fallait étudier les anneaux colorés dans leur rapport avec cette nouvelle propriété: M. Arago réalisa cette étude avec un immense bonheur.

Regardés à travers un spath, dont la section principale était parallèle ou perpendiculaire au plan de réflexion, les anneaux colorés fournissent deux images d'intensités égales, quand on les regarde sous l'incidence perpendiculaire. L'inclinaison croissant, l'une d'elles (l'extraordinaire, si la section principale est parallèle au plan de réflexion, l'ordinaire dans le cas contraire) faiblit incessamment, pour disparaître sous l'angle de polarisation du verre, et reparaître ensuite avec une intensité graduellement croissante, sous des inclinaisons plus aiguës. Cette expérience prouve que la polarisation due à la réflexion de la lumière sur la face inférieure de la lentille supérieure, par exemple, est complétement indépendante du voisinage si rapproché de la surface supérieure de la lentille inférieure, quoique l'angle de polarisation, à la surface de séparation de deux milieux, diffère essentiellement de l'angle correspondant à chacun de ces deux milieux, pris isolément.

Les résultats obtenus sur les anneaux colorés, produits entre une

lentille de verre et un miroir métallique, ayant été les mêmes que es précédents, il semblait naturel de conclure que la réflexion à laquelle sont dus les anneaux réfléchis s'opérait à la surface inférieure de la lentille supérieure, à moins que la lame mince traversée par les rayons n'eût elle-même, à cause de son extrême ténuité, une action spéciale sur ces rayons. La conclusion restait donc indécise, et l'on ne pouvait la résoudre qu'en examinant les anneaux transmis. Si la polarisation avait lieu par réflexion, les rayons transmis devaient être polarisés perpendiculairement au plan d'incidence, lorsque les rayons réfléchis sont polarisés dans ce plan. Or, il arrive que la polarisation est la même pour ces deux sortes de rayons. Vus perpendiculairement, les anneaux transmis se décomposent à travers un spath en deux séries également vives. L'une d'elles s'affaiblit par degrés, à mesure que la ligne visuelle s'incline vers la surface des lentilles, disparait complétement sous l'inclinaison de 35°, se montre de nouveau sous des inclinaisons plus petites, et avec une intensité progressivement constante : ces modifications sont toujours de même genre que celles éprouvées par les anneaux réfléchis. C'est un exemple unique d'une lumière blanche, décomposée en deux parties distinctes, qui suivent des routes différentes et sont cependant polarisées similairement. Mais cette action particulière de la lame mince d'air ne se produit que sur la portion des rayons transmis qui concourt à la formation des anneaux.

Lorsqu'on place une lentille de verre sous une plaque de spath d'Islande, elle donne deux systèmes d'anneaux, provenant des deux faisceaux que produit le spath. Si, se plaçant sous l'incidence de 35°, on fait tourner l'ensemble des deux plaques, on voit, durant ce mouvement, chaque série disparaître deux fois.

L'examen des anneaux transmis donne lieu à des faits analogues ; mais dans le cas de deux plaques de verre, l'image qui renait quand l'inclinaison décroît à partir de 35°, converge vers une polarisation partielle opposée à celle que la réflexion lui avait donnée sous cet angle de 35°.

En plaçant le spath dans les positions où il y a deux images, ces deux images paraissent (sauf l'intensité qui n'est égale que dans deux situations) jouir, dans toutes les obliquités, d'une similitude parfaite à l'égard des teintes.

Mais en substituant une plaque métallique au verre inférieur, cette identité de teinte des deux images des anneaux que donne le spath ne se soutient que jusqu'à l'incidence de 35° sur la surface.

En supposant la section principale du spath parallèle ou perpendiculaire au plan de réflexion, l'image qui disparait sous l'incidence de 35° reparait au-delà avec des teintes précisément complémentaires de celle qui n'a pas disparu.

Ainsi donc, sous des inclinaisons moindres que 35°, la plaque métallique est pour la lumière qui a formé les anneaux la cause d'une modification particulière qui la rend à la fois distincte et de la lumière ordinaire et de la lumière polarisée, puisqu'un spath la décompose en deux images dissemblables.

De tous ces faits, deux seuls exigent une explication particulière; ce sont: 1° le parallélisme des plans de polarisation des anneaux réfléchis et transmis, et la tendance vers une polarisation opposée, sous une incidence qui excède celle de la polarisation complète; 2° le changement qu'éprouve un des deux systèmes d'anneaux à travers un prisme biréfringent, au-delà de l'angle de polarisation complète, lorsque la plaque inférieure est métallique.

165. Pour rendre compte du premier fait, il faut considérer la lumière incidente comme composée de deux faisceaux d'égale intensité; polarisés, l'un dans le plan de réflexion, l'autre dans un plan perpendiculaire, et calculer les intensités des rayons réfléchis à la seconde surface de la lame mince et de ceux qui sortent après deux réflexions intérieures, en tenant compte des quantités de lumière perdue à toutes les réflexions et les réfractions qu'ils ont éprouvées. Ces intensités étant précisément celles des anneaux transmis, considérés comme décomposés en deux systèmes d'anneaux polarisés dans le plan d'incidence et perpendiculairement à ce plan, celui de ces systèmes qui aura la plus grande intensité déterminera le sens de la polarisation des anneaux transmis, et en faisant le calcul, on trouve que les rayons polarisés dans le plan d'incidence ont une plus grande intensité que les autres. Donc les anneaux transmis, comme les anneaux réfléchis, seront polarisés dans le plan d'incidence.

Quant au fait observé, lorsque la plaque inférieure est métallique, il se réduit évidemment à ceci : au-delà de l'incidence cor-

respondante à l'angle de polarisation, un des deux systèmes de rayons réfléchis qui interfèrent éprouve un retard d'une demi-longueur d'ondulation. Ce retard est une conséquence nécessaire des formules par lesquelles M. Cauchy représente rigoureusement les phénomènes des anneaux colorés dans le cas où la seconde surface est opaque et métallique. M. Airy cherchait à tort à l'expliquer en partant des formules relatives aux corps transparents. Les vitesses pour les rayons réfléchis à la première et à la seconde surface de la lame mince sont, disait-il, de même signe que les quantités :

$$\text{tang.}\ (i+\rho),\quad \text{tang.}\ (i+\rho')$$

ρ et ρ' étant les angles de réfraction correspondant à l'angle d'incidence i dans la lame mince et dans le dernier milieu. Or, quand $i+\rho$ dépasse 90°, c'est-à-dire quand i dépasse l'angle de polarisation, tang. $(i+\rho)$ change de signe ; et comme il n'en est pas de même de tang. $(i+\rho')$, attendu que, le second milieu étant métallique, ρ' serait beaucoup plus petit que ρ, les vitesses sont de signe contraire. Par conséquent, la différence entre les chemins parcourus est égale à une demi-longueur d'ondulation.

Cette explication, doublement erronée dans son principe et dans l'hypothèse admise que les indices de réfraction des métaux sont plus petits que ceux des substances apparentes, prouvait au moins que si on formait des anneaux avec une lame d'air renfermée entre deux lames minces transparentes, dont la première serait moins réfringente que la seconde pour les incidences comprises entre $i+\rho=90°$ et $i+\rho'=90°$, on aurait des anneaux à centre blanc, si la lumière était polarisée dans un plan perpendiculaire au plan de réflexion ; deux systèmes d'anneaux, si la lumière était naturelle, l'un à centre noir, l'autre à centre blanc superposé, et que l'on pourrait facilement séparer en les observant avec un prisme biréfringent. L'expérience a complétement confirmé ces conséquences de la théorie des ondulations, qui, cette fois encore, a un immense avantage sur la théorie vide et stérile de l'émission.

174. Après les recherches si heureuses et si patientes des fondateurs de l'optique ancienne et moderne, de Newton, de Fresnel et de M. Arago, il semblait qu'il ne restait plus rien à découvrir relativement aux anneaux des plaques minces, lorsque M. Brewster,

étendant les expériences faites en 1811 par M. Arago, arriva à des résultats nouveaux, ou qui du moins n'étaient compris qu'implicitement dans les énoncés de l'illustre secrétaire de l'Académie des sciences. Son mémoire, publié dans les *Transactions philosophiques*, année 1841, a pour titre : *Sur les apparences que présentent dans la lumière polarisée les plaques minces de plusieurs substances solides et fluides.* Je vais l'analyser rapidement, et montrer avec quelle facilité M. Lloyd donna dans le système des ondulations la théorie de ces faits nouveaux.

Les expériences de M. Brewster eurent pour point de départ l'iriscope, instrument récemment inventé, dit-il, par M. Joseph Reade, et qui se compose d'une plaque de verre noir parfaitement polie, dont la surface est recouverte d'abord d'une solution de savon très fin, et frottée ensuite avec un morceau de peau de chamois sèche. Si, à l'aide d'un tube de verre, on souffle sur la surface vitreuse ainsi préparée, la vapeur se dépose en anneaux brillants, dont les bords extérieurs sont noirs, tandis qu'à l'intérieur ils sont colorés ou blancs, suivant que la quantité de vapeur déposée est plus ou moins grande. Les couleurs de ces anneaux vus avec la lumière ordinaire répondent à celles des anneaux réfléchis de Newton ou des anneaux à centre noir, sauf cette seule différence, qu'avec la couche de vapeur plus épaisse dans son milieu, les anneaux de l'iriscope ont des contours noirs.

Les mêmes anneaux se forment avec plus ou moins d'éclat à la surface polie de presque toutes les substances transparentes, quoique quelques unes d'entre elles et même certains morceaux de verre n'absorbent pas le savon. Peu importe d'ailleurs que le poli soit naturel ou artificiel, qu'il soit le résultat de la cristallisation, du clivage ou du frottement. Le savon est peu à peu dissous par la vapeur, et doit par conséquent être renouvelé; on peut le remplacer par certaines huiles et par d'autres corps. L'éclat et la pureté des anneaux dépendent aussi de la température relative de la vapeur et du verre. Si l'on fait naître sur l'iriscope un grand système d'anneaux, ou si l'on y fait déposer la vapeur en ligne droite, on pourra étudier tour à tour à l'aide de cet instrument les phénomènes des bandes ou des anneaux colorés, en les observant sous divers angles d'incidence.

175. M. Arago observa le premier, comme nous l'avons dit, les modifications que subissent dans la lumière polarisée les anneaux de Newton. Lorsque ces anneaux résultaient de la pression d'une lentille contre une surface de verre, ils avaient généralement le centre noir, et soit qu'on les observât à l'œil nu ou à l'aide d'un prisme doublement réfringent, le système d'anneaux simple ou double avait les mêmes couleurs, le même diamètre; il était complétement polarisé sous l'angle de polarisation du verre.

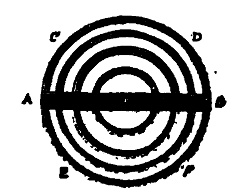
Lorsque la surface contre laquelle la lentille était pressée était métallique, et qu'on observait les anneaux à l'aide d'un rhomboèdre de spath calcaire, on voyait entre les incidences de 90° et de 55° deux images parfaitement égales. L'une d'elles disparaissait complétement sous l'angle de 55°, qui est l'angle de polarisation du verre, quand le plan principal du rhombe était perpendiculaire ou parallèle au plan de réflexion. Sous un angle d'incidence plus grand, le système reparaissait, mais avec cette propriété que les couleurs de chacun des anneaux dont il se composait étaient complémentaires des couleurs correspondantes du système qui s'était évanoui.

M. Arago remarqua encore qu'on pouvait s'assurer même à l'œil nu, sans le secours d'un cristal, que, sous un certain angle très rapproché de 55°, les anneaux se composaient de deux séries de diamètres inégaux, et que ces deux séries, très inégalement polarisées, étaient très distinctement séparables par le moyen d'un rhombe. Il trouva aussi que ces phénomènes n'avaient plus lieu lorsque les anneaux étaient formés sur des cristaux naturels de soufre ou sur le diamant.

M. Arago ajoutait enfin que si la présence d'un miroir métallique était nécessaire à la production de ces phénomènes, lorsque les anneaux étaient formés par une lame d'air, il en était tout autrement dès que la substance mince avait une certaine épaisseur, et se trouvait en contact par une de ses faces avec un autre milieu d'un pouvoir réfringent suffisant. Ainsi le charbon de terre présente souvent dans ses feuillures des couleurs très brillantes, produites par une substance extraordinairement mince, et lorsqu'on regarde ces couleurs à travers un rhomboïde sous des incidences assez aiguës, on les voit se partager en deux images complémentaires. Les couleurs produites

par l'évaporation d'une couche d'alcool ou d'huile de sassafras déposée sur du charbon de terre ou sur les substances analogues donnent lieu dans les mêmes circonstances à deux images inégales et teintes de couleurs contraires. M. Arago n'étendit pas plus loin ses recherches.

176. Pour étudier les apparences des franges de vapeurs de l'iriscope, M. Brewster les éclaira avec de la lumière polarisée à 90° ou perpendiculairement au plan d'incidence; puis en déplaçant peu à peu son œil armé d'une loupe, il arriva à voir le centre des anneaux dans un faisceau de lumière réfléchi sous l'angle de 53°,11', qui est l'angle de polarisation de l'eau. La figure ci-jointe représente le phénomène très frappant dont il fut alors témoin. La partie

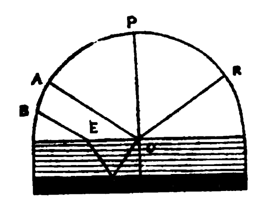


centrale AB du système CDEF ne présentait ni anneaux ni couleurs. La partie supérieure CD était une portion d'un système d'anneaux à contours blancs, et se trouvait formée par la lumière polarisée, qui rencontrait la couche de vapeur sous un angle plus grand que l'angle de polarisation de l'eau. La partie inférieure, au contraire, était une fraction d'un système d'anneaux à contours sombres, semblable à ceux que l'on voit avec la lumière ordinaire, et elle provenait de la lumière polarisée qui avait rencontré la couche de vapeur sous un angle plus petit que l'angle de polarisation de l'eau.

L'absence d'anneaux dans la partie moyenne provenait à son tour de ce que la partie antérieure de la couche ne réfléchissait aucune lumière qui pût interférer avec celle que réfléchissait la surface postérieure. Cette dernière surface d'ailleurs réfléchissait encore des rayons, parce que la lumière ne la rencontrait pas sous son angle de polarisation.

177. M. Brewster avait déjà démontré que si l'on étend une couche d'eau sur un verre dont le pouvoir réfringent surpasse le nombre 1,508, il n'existe pour la surface antérieure aucun angle

d'incidence qui permette au rayon réfracté de rencontrer le verre sous son angle de polarisation, et que, par conséquent, quel que soit l'angle d'incidence sur la couche liquide, le rayon réfracté sera réfléchi par le verre sous des angles toujours plus petits que l'angle de polarisation des milieux unis, c'est-à-dire plus petits que l'angle dont la tangente serait égale à $\frac{\rho}{\rho'}$, ρ et ρ' étant respectivement les indices de réfraction du verre et de l'eau. Si l'indice de réfraction du verre est égal à 1,508, l'angle d'incidence sur la couche d'eau doit être sensiblement égal à 90° pour que le rayon réfracté rencontre le verre sous l'angle de polarisation dont la tangente est $\frac{\rho}{\rho'}$.



Si nous revenons maintenant aux portions CD, EF, la première est produite, comme nous l'avons dit, par l'interférence des deux faisceaux lumineux CA, DEB, réfléchis, l'un CA, sous un angle DCA plus grand, l'autre EB, sous un angle plus petit que l'angle de polarisation de l'eau; tandis que la seconde provient de l'interférence de deux faisceaux réfléchis tous deux sous des angles plus grands ou plus petits que l'angle de polarisation de l'eau. On peut donc admettre que dans la formation des anneaux à contours blancs, comme dans celle des anneaux à centre blanc, il y a perte d'une demi-ondulation, et que la même perte a lieu, que les rayons réfléchis qui interfèrent soient des rayons ordinaires, ou des rayons polarisés réfléchis du même côté de l'angle de polarisation.

Si l'on considère les anneaux formés sous des angles d'incidence compris entre 0° et 53°,11′, on voit qu'ils sont à contours noirs, comme la portion EF. Ils offrent, au contraire, des contours blancs, comme la portion CD, quand on les regarde sous des angles d'incidence compris entre 53°,11′ et 90°.

178. Si les franges de vapeur étaient formées sur la surface polie

du spath fluor, les choses se passeraient tout autrement. Sous tous les angles d'incidence compris entre 0° et 78°, la composition des anneaux est tout-à-fait semblable à celle de ceux que nous venons de décrire; mais le rapport des indices de réfraction de l'eau et du spath fluor est tel que le rayon qui rencontre la couche de vapeur sous l'angle de 78°,4′ arrive à la surface du spath fluor, de manière à être réfléchi par cette surface sous l'angle de polarisarion des milieux unis : ainsi les indices de réfraction du spath fluor et de l'eau étant respectivement $\rho = 1,427$, $\rho' = 1,336$, on aura $\frac{\rho}{\rho'} = 1,0750$: ce dernier nombre est l'indice de réfraction des milieux unis ou de leur surface de séparation. L'angle de polarisation de cette surface sera dès lors un angle dont la tangente est 1,0756, c'est-à-dire qu'il sera sensiblement égal à 47°,5. Or l'angle d'incidence à la surface antérieure de la couche d'eau qui répond à un angle de réfraction égal à 47°,5 ou à l'angle d'incidence 47°,5 sur la surface postérieure est précisément égal à 78°,4′.

Sous cet angle d'incidence de 78°,4′, les anneaux disparaîtraient donc, comme sous l'angle de 55°,11′, parce que le faisceau qui tombe sur le spath fluor n'est pas réfléchi.

M. Brewster n'a pas réalisé cette expérience ; il eût été probablement très difficile d'observer des anneaux colorés sous une si faible incidence. Si l'on considère les anneaux formés avec du savon sur le verre, ou de l'alcool sur le spath fluor, on trouvera que leur seconde disparition aura lieu lorsque les angles d'incidence sur la surface antérieure seront respectivement 71°,45′, 82°,32′.

179. En général, si ρ et ρ' sont les indices de réfraction des deux substances employées, c'est-à-dire de la couche mince et de la surface qui la supporte, et si ρ est le plus grand de ces deux indices, un rayon incident à 90° rencontrera la surface de séparation des deux milieux sous l'angle de polarisation, si l'angle de réfraction de la surface antérieure est égal à la tangente ou à la cotangente de l'angle de polarisation, suivant que le pouvoir réfringent de la couche mince est plus petit ou plus grand que celui du corps sur lequel elle repose ; on aura donc, en appelant i l'angle d'incidence :

$$\sin i = \frac{1}{\rho} \quad \text{ou} \sin i = \frac{1}{\rho'}, \quad \text{tang}\, i = \frac{\rho}{\rho'}, \quad \text{ou} \cot i = \frac{\rho}{\rho'},$$

$$\rho = \frac{\rho'}{\sqrt{\rho'^2 - 1}} \quad \text{ou} \ \rho' = \frac{\rho}{\sqrt{\rho^2 - 1}}.$$

A l'aide de ces formules, on peut déterminer entre quelles limites des indices de réfraction le second évanouissement des anneaux peut avoir lieu, et quelle substance il faut employer pour pouvoir l'observer. On trouve ainsi que ces limites sont pour les indices de réfraction 1,554, indice de réfraction du quartz et du flint-glass, et 1,307, indice de réfraction de la glace. Quoique la différence entre ces nombres soit assez petite, ils comprennent cependant une assez grande variété de substances.

Si donc ρ et ρ' sont ainsi détérminés, les anneaux à centre blanc disparaîtront précisément quand l'angle d'incidence sera égal à 90°, parce qu'alors la lumière rencontre la seconde surface sous l'angle de polarisation.

Mais si l'on emploie une couche d'un pouvoir réfringent encore moindre, par rapport à la substance qui la supporte, les rayons réfractés, si i est toujours égal à 90°, rencontreront la seconde surface sous un angle plus grand que l'angle de polarisation, et, par conséquent, les anneaux à centre noir reparaîtront. Il y aura pour la couche liquide un angle d'incidence i_p, pour lequel l'angle de réfraction i sera égal à l'angle de polarisation sur la seconde surface : cet angle sera déterminé par l'équation : $\sin i_p = \frac{\rho\rho'}{\sqrt{\rho^2 + \rho'^2}}$.

Si $\rho = \rho'$, il ne se formera aucun anneau, parce qu'il n'y aura aucune lumière réfléchie à la surface de séparation. Mais si ρ n'est égal à ρ' que pour une couleur particulière du spectre produit par les deux substances, et si les deux indices de réfraction varient notablement pour les autres couleurs, il y aura des anneaux dans lesquels dominera la couleur pour laquelle $\rho > \rho'$ ou $\rho' > \rho$. Ce résultat se trouve réalisé d'une manière remarquable pour l'huile de cassia et le flint-glass : ρ est égal à ρ' pour le rayon rouge, et plus grand que ρ' pour le rayon bleu. Par suite, une lumière bleue surabondante sera réfléchie par la surface de séparation de l'huile et du verre, et

si l'on dépose sur le verre une couche d'huile suffisamment mince, la lumière bleue dominera beaucoup dans le système d'anneaux obtenus.

180. Jusqu'ici l'azimuth du rayon polarisé était de 90°, c'est-à-dire que ce rayon était polarisé perpendiculairement au plan d'incidence. Admettons maintenant que cet azimuth par la rotation de la surface polarisante prenne toutes les valeurs intermédiaires entre 0 et 90°. Pendant cette rotation, on voit des anneaux avec contour noir, tant que l'angle d'incidence est compris entre 0° et 53°,11′; mais au-delà, entre 53°,11′ et 90°, l'iriscope devient la source de phénomènes très intéressants. Décrivons d'abord ce qui a lieu sous l'angle de 56°,45′, angle de polarisation du verre noir.

Sous cet angle la lumière n'est pas du tout réfléchie, si l'azimuth du plan de polarisation est de 90°, et l'on voit alors les anneaux à contour blanc sur le fond noir du verre qui ne réfléchit aucune lumière. Mais dès que l'azimuth atteint 87°, 88°, la glace noire réfléchit quelque lumière, les deux faces de la couche en réfléchissent un peu plus, les anneaux pâlissent de plus en plus, jusqu'à ce qu'ils s'évanouissent aussi complétement, lorsque l'azimuth est sensiblement égal à 79°, qu'ils le faisaient sous l'angle de 53°,11′ et l'azimuth de 90°. Au moment de cette disparition, la lumière réfléchie par le verre semble exactement égale à celle qui est réfléchie par les deux faces de la couche. Lorsque l'angle d'incidence a une autre valeur, les anneaux s'évanouissent encore pour des azimuths déterminés qui oscillent entre 90° et 45°, pendant que l'angle d'incidence varie entre 53°,11′ et 90°. M. Brewster avait cependant de la difficulté à déterminer ces azimuths, parce que les anneaux n'étaient pas permanents. Il était forcé en conséquence d'étudier les couleurs des plaques minces sur des substances fortement réfringentes, comme le diamant, le chromate de plomb, le réalgar artificiel, la greenockite, etc., pour lesquelles l'angle de polarisation est très grand. La dernière de ces substances est la plus réfringente de toutes les substances connues. Une solution de savon donne, après qu'elle a été desséchée, des couleurs brillantes. Voici le résultat des observations faites par M. Brewster sur un diamant. L'indice de réfraction du savon était 1,475, celui du diamant 2,44, les angles de polarisation étaient respectivement 55°,52′ et 67°,43′.

Angle d'incidence de la lumière polarisée.	Azimuth du plan de polarisation pour lequel les anneaux disparaissent.	
	Observé.	Calculé.
55°,52′	90°,0′	90°,0′
60°	73°,0	74°,27
65°	68°,30′	67°,49
67°,43	66°,20	65°,10
70°	63°,30	63°,14
75°	59°,15	58°,23
90°		46°,30.

Comme la disparition des anneaux n'a évidemment pas pour cause, comme dans le cas de l'angle de 55°,52′, l'extinction de l'un des rayons interférents, puisqu'une quantité suffisante de lumière polarisée est réfléchie par les deux surfaces de la couche, il faut nécessairement en chercher la raison dans ce fait que les deux rayons sont polarisés perpendiculairement l'un à l'autre. Nous avons déjà dit que deux rayons polarisés à angle droit n'interfèrent pas.

181. En appliquant à ce genre de recherches les formules de Fresnel et celles qu'il avait démontrées expérimentalement, M. Brewster arrive à la loi suivante, qui est l'expression vraiment remarquable des faits observés par lui.

Si deux faisceaux de lumière polarisée sont réfléchis par les deux faces d'une plaque mince, posée sur une surface réfléchissante d'un pouvoir réfringent différent, il n'y aura point de demi-ondulation perdue, et, par conséquent, il se formera des anneaux à centre blanc, tant que l'inclinaison mutuelle de leurs plans de polarisation sera plus grande que 90°. Si cette inclinaison est plus petite que 90°, il y aura une demi-ondulation perdue, et l'on verra apparaître des anneaux à centre noir. Enfin si l'inclinaison est exactement égale à 90°, les rayons polarisés n'interféreront pas; il n'y a plus d'anneaux colorés.

182. M. Brewster était curieux d'étudier toutes les particularités du système parfait d'anneaux formés dans le cas où la plaque mince a un pouvoir réfringent plus grand que la substance sur laquelle elle repose. Il y parvint après plusieurs vaines tentatives,

en déposant une très petite quantité d'huile de laurier sur de l'eau placée dans un vase noir, ou sur de l'encre étendue ou non étendue d'eau. Les anneaux ainsi obtenus étaient magnifiques, et présentaient dans tout leur éclat les apparences que nous venons de décrire. Comme l'angle de polarisation de l'huile surpasse celui de l'eau, on voyait les anneaux à centre noir sous l'angle de polarisation de l'eau, pour lequel la lumière réfléchie s'évanouit. Ils continuèrent à se montrer jusqu'à ce que l'angle d'incidence atteignît l'angle de polarisation de l'huile; ils s'évanouirent alors; les anneaux à centre blanc commencèrent, et restèrent visibles jusqu'à l'incidence de 90°.

183. En examinant les couches minces de substances étrangères qui se déposent naturellement ou artificiellement à la surface de divers métaux, en donnant naissance à des anneaux colorés, M. Brewster retrouva des phénomènes partout semblables à eux-mêmes, et qui différaient peu de ceux qu'il avait observés avec des substances transparentes.

Ainsi, par exemple, lorsqu'il eut déposé sur le métal des miroirs une pellicule très mince d'huile de laurier, il trouva que les anneaux colorés ainsi obtenus, et qui étaient très beaux, disparaissaient presque entièrement sous l'angle de 55°, qui est l'angle de polarisation de l'huile. Les anneaux à centre noir apparaissaient sous tous les angles plus petits que 56°, les anneaux à centre blanc sous tous les angles plus grands. On voyait parfaitement les anneaux sous les plus grands angles d'incidence, ce qui n'a pas lieu pour les substances transparentes d'un faible pouvoir réfringent. Pendant que l'azimuth du plan de polarisation variait de 90 à 0°, les anneaux disparaissaient sous diverses incidences, de même qu'ils s'évanouissaient pour divers azimuths, tandis qu'on faisait varier l'angle d'incidence.

L'argent faisait exception à la loi commune, en ce sens qu'il était très difficile d'observer les azimuths pour lesquels les anneaux disparaissaient. Ne trouverions-nous pas dans ce fait une conformation expérimentale de la théorie de M. Cauchy, suivant laquelle l'argent serait tout-à-fait comparable aux substances peu réfringentes, son indice de réfraction n'étant que de 0,343, tandis que l'indice de réfraction du métal des miroirs est égal à 1,716?

Si dans les expériences qui précèdent on emploie de la lumière ordinaire au lieu de lumière polarisée, et qu'on analyse la lumière réfléchie au moyen d'un rhomboïde de spath calcaire, on retrouvera à peu près les mêmes phénomènes.

184. Ils seront, au contraire, de nature tout-à-fait différente, si les pellicules ou les lames minces ne sont pas déposées sur la surface de corps solides ou liquides. Les anneaux conservent toujours alors les mêmes couleurs et le même caractère, sous toutes les incidences et pour tous les azimuths, que la lumière employée soit ordinaire ou polarisée. Pour mettre ce résultat en évidence, M. Brewster étendit de petites pellicules de diverses huiles, par exemple : de l'huile de laurier, de l'huile de cassia, de l'huile de térébenthine, sur de petites ouvertures rondes, et les examina avec la lumière dans divers azimuths. Les anneaux disparurent sous l'angle de polarisation de l'huile; l'éclat des couleurs varia avec l'azimuth et l'angle d'incidence, mais jamais on ne vit les anneaux complémentaires, ils restèrent toujours à centre noir. Pour parvenir à découvrir la cause de ce fait singulier, M. Brewster calcula la position des plans de polarisation des rayons interférents, et s'assura que dans tous les cas ils étaient réfléchis tous deux sous des angles à la fois plus grands, ou à la fois plus petits que l'angle de polarisation; et que, par suite, leurs plans de polarisation, toujours situés du même côté du plan de réflexion et dans le même quadrant, ne peuvent pas être perpendiculaires, et sont, en conséquence, dans l'impossibilité d'interférer. Par la même raison, l'inclinaison du plan de polarisation ne peut jamais surpasser 90°, ce qui serait nécessaire, suivant la loi que nous venons d'énoncer, pour que les anneaux complémentaires à centre blanc pussent succéder aux anneaux à centre noir.

185. Les phénomènes que nous venons de décrire seraient beaucoup plus variés et plus intéressants, si la surface postérieure de la pellicule était inclinée par rapport à la première. On pourrait produire de cette manière des effets analogues à ceux que l'on obtient en modifiant le pouvoir réfringent de la surface postérieure par son contact avec une seconde surface réfringente; obtenir, par exemple, des faisceaux qui fussent perpendiculaires, et qui donneraient, par conséquent, naissance à des anneaux à centre blanc. Les faits pro-

duits seraient alors les mêmes que ceux que l'on obtient à l'aide d'une couche d'huile répandue sur l'eau.

Si l'indice de réfraction d'une pellicule à faces parallèles surpasse 1,508, le rayon rencontre la surface postérieure sous un angle plus petit que l'angle de polarisation; mais en inclinant la surface postérieure, cet angle d'incidence pourrait devenir plus grand que l'angle de polarisation. Les apparences seraient plus variées encore, si la surface de sortie était inclinée par rapport à la face d'incidence.

Mais comme il n'est pas facile d'obtenir des pellicules avec surfaces convenablement inclinées les unes sur les autres, il est inutile de s'étendre plus longtemps sur ce sujet.

Ajoutons que les apparences physiques produites par ces pellicules sont vraiment remarquables. A partir du bord et du centre du disque, on aperçoit un courant transversal de fluide qui simule la pointe d'un ananas. Ce courant fait que la pellicule est plus mince en certains endroits que dans d'autres, et donne naissance à un système irrégulier de bandes colorées, avec un jeu incessant des couleurs les plus variées, absolument comme si la pellicule était animée. Les bandes colorées sont bordées de points saillants, d'où le fluide semble s'élancer transversalement. Ces apparences sont surtout remarquables avec l'huile de cannelle, de pétrole, de menthe poivrée, d'absinthe, de navette, de noix muscade, de bergamote, de genévrier, de romarin, etc., etc. Avec l'huile de pavot blanc, on voit jusqu'au vert et au rouge du quatrième, du cinquième et du sixième ordre.

186. Toujours prévenu contre le système des ondulations qu'il a cru souvent renverser, oubliant une fois encore que chacune de ses attaques avait été l'occasion d'un triomphe nouveau, M. Brewster avait comme défié M. Lloyd de donner dans ce système la théorie des phénomènes qu'il avait observés. L'illustre physicien irlandais releva noblement le gant. M. Airy avait déduit, comme nous l'avons vu, de la formule de Fresnel, qui donne la quantité de lumière réfléchie, que tout rayon polarisé perpendiculairement au plan d'incidence éprouve une modification remarquable dans sa réflexion par une plaque mince comprise entre deux surfaces réfringentes, dès que l'angle d'incidence est compris entre les angles de polarisation des

deux surfaces. Ces déductions anticipées de la théorie avaient été pleinement confirmées par l'expérience. Lorsqu'une lentille d'un faible pouvoir réfringent était posée sur une plaque plus réfringente, les anneaux formés avaient un centre noir, dès que l'angle d'incidence était plus petit que l'angle de polarisation de la surface moins réfringente, ou plus grand que l'angle de polarisation de la surface plus réfringente. Le centre des anneaux, au contraire, était blanc, et le nouveau système d'anneaux était complémentaire du premier, lorsque l'angle d'incidence était compris entre les deux angles de polarisation. Les anneaux s'évanouissaient sous l'angle de polarisation, parce qu'aucune lumière n'était réfléchie par une des deux surfaces, et qu'il ne pouvait, par conséquent, y avoir lieu à interférence.

Sont venues ensuite les recherches de M. Brewster, qui répéta les expériences de M. Airy en les généralisant, c'est-à-dire en employant de la lumière incidente polarisée sous tous les azimuths; il a obtenu de cette manière les résultats nouveaux que nous avons énumérés. Il a vu les anneaux s'évanouir dans des circonstances où la lumière était certainement réfléchie par les deux surfaces de la plaque mince; il a mis en évidence plusieurs particularités remarquables dans le passage d'un système d'anneaux à un système complémentaire.

187. Pour établir la théorie de ces phénomènes, M. Lloyd généralise à son tour les méthodes suivies en pareil cas par Poisson et M. Airy. Il décompose la vibration incidente en deux autres : l'une parallèle, l'autre perpendiculaire au plan d'incidence. Chaque composante donne naissance à une série indéfinie de réflexions entre les deux surfaces de la couche mince. Quand on a trouvé l'expression de l'intensité de la lumière réfléchie correspondante à chacune de ces composantes, il suffit de faire la somme de ces intensités partielles pour avoir l'intensité définitive et réelle du rayon résultant réfléchi.

En désignant par I_r cette intensité, par γ l'azimuth du plan de polarisation du rayon incident, par u, u' les rapports de la lumière réfléchie par les deux surfaces de la plaque à la vibration incidente, lorsque la lumière est polarisée dans le plan d'incidence, par v, v' les mêmes rapports pour la lumière polarisée perpendicu-

lairement au plan d'incidence, par θ l'angle d'incidence à la première surface, par θ' l'angle de réfraction correspondant qui est en même temps l'angle d'incidence à la seconde surface, par θ'' l'angle de réfraction à cette seconde surface, par α la différence de phase de deux portions successives du faisceau réfléchi, par e l'épaisseur de la plaque, par λ la demi-longueur d'onde, M. Lloyd a trouvé :

$$I_r = \cos^2\gamma \frac{u^2 + 2uu' \cos\alpha + u'^2}{1 + uu' \cos\alpha + u^2 u'^2} + \sin^2\gamma \frac{v^2 + 2vv' \cos\alpha + v'^2}{1 + 2vv' \cos\alpha + v^2 v'^2}$$

$$u = \frac{\sin(\theta - \theta')}{\sin(\theta + \theta')}, \quad u' = \frac{\sin(\theta' - \theta'')}{\sin(\theta' + \theta'')}$$

$$v = \frac{\text{tang}(\theta - \theta')}{\text{tang}(\theta + \theta')}, \quad v' = \frac{\text{tang}(\theta' - \theta'')}{\text{tang}(\theta' + \theta'')}$$

$$\alpha = \frac{4\pi}{\lambda} e \cos\theta'$$

Si l'obliquité du rayon incident n'est pas très grande, on pourra négliger auprès de l'unité le carré et les puissances supérieures des rapports u, u', v, v', et l'on aura :

$$I_r = \cos^2\gamma (u^2 + 2uu' \cos\alpha + u'^2) + \sin^2\gamma (v^2 + 2vv' \cos\alpha + v'^2).$$

Cette valeur sera indépendante de la phase α, il n'y aura par conséquent pas d'interférence, l'intensité de la lumière réfléchie sera constante, et les anneaux disparaîtront, si l'on a :

$$uu' \cos^2\gamma + vv' \sin^2\gamma = 0$$

$$\text{tang}^2\gamma = -\frac{uu'}{vv'} = -\frac{\cos(\theta - \theta')\cos(\theta' - \theta'')}{\cos(\theta + \theta')\cos(\theta' + \theta'')}.$$

Dans cette formule, $\cos(\theta - \theta')$ et $\cos(\theta' - \theta'')$ sont toujours positifs : $\text{tang}^2\gamma$ ne sera positif, l'angle γ ne sera réel, et la disparition des anneaux colorés n'aura lieu qu'autant que $\cos(\theta + \theta')$ et $\cos(\theta' + \theta'')$ seront de signes contraires : ce qui suppose nécessairement que les angles d'incidence sur les deux surfaces devront être plus grands dans un cas, plus petits dans l'autre, que les angles de polarisation, comme M. Brewster l'avait observé.

De plus, les phases α', α'' des deux portions des faisceaux réflé-

chis, polarisés parallèlement ou perpendiculairement au plan d'incidence, sont données par les formules :

$$\text{tang}\ \alpha' = \frac{u'(1 - u^2)\sin\alpha}{u(1 + u'^2) + u'(v + u^2)\cos\alpha},$$

$$\text{tang}\ \alpha'' = \frac{v'(1 - v^2)\sin\alpha}{v(1 + v'^2) + v'(1 + v^2)\cos\alpha}.$$

Ces deux phases sont donc généralement différentes, et le rayon réfléchi sera en général polarisé elliptiquement.

188. M. Lloyd déduit ensuite de ces formules des conclusions nouvelles qui semblent avoir échappé à M. Brewster dans le cours de ses recherches, et fait ressortir le rapport remarquable que ce genre de phénomènes peut avoir avec la polarisation elliptique à la surface des métaux.

En même temps qu'il explique les faits découverts par M. Brewster, il s'ouvre un champ nouveau, et devance l'expérience. L'avantage appartient donc cett· fois encore à la théorie des ondulations, qui rend compte des phénomènes observés, et fait prévoir des phénomènes inconnus.

189. M. Arago a trouvé dans les anneaux colorés un procédé photométrique ou un moyen rigoureux de comparer les intensités de deux lumières provenant de deux sources quelconques. Nous avons dit ailleurs par quelle ingénieuse expérience il était parvenu à mettre en évidence l'état complémentaire des anneaux réfléchis et transmis. Il s'agissait de substituer à une opération de mesurage fort délicate l'observation matérielle d'un fait, d'échanger l'estimation difficile des couleurs contre l'appréciation toute simple de la présence ou de l'absence d'un phénomène. Il fallait en un mot faire coïncider les anneaux réfléchis et transmis pour prouver par l'évanouissement de toute couleur et l'égalité mathématique des dimensions, et l'égalité d'intensité, et l'état complémentaire des anneaux correspondants. Or, rien n'est plus simple : il suffit en effet pour cela de placer un système de deux verres, semblables de forme et égaux en épaisseur, devant un mur blanc ou une feuille de papier dont tous les points soient éclairés avec la même intensité : tandis que la partie supérieure donnera des anneaux réfléchis, la partie inférieure

en donnera de transmis en tout identiques avec ceux qui répondent aux anneaux réfléchis et qui se trouvent renvoyés à l'œil précisément sur la route des premiers. Or, par suite de cette seule superposition, il y a neutralisation complète des deux systèmes.

190. Pour passer de la comparaison des deux systèmes d'anneaux à celle de deux lumières quelconques; pour comparer, par exemple, une bougie avec une lampe, on disposera un transparent de papier blanc séparé d'un côté en deux parties par un obstacle opaque. De part et d'autre de cet obstacle, on placera les deux lumières, qui n'éclaireront ainsi chacune que la moitié du transparent; puis on offrira à la partie antérieure et libre de l'écran un système de deux verres égaux, dans une position symétrique convenable à la production d'anneaux réfléchis avec la lumière d'une moitié de l'écran, et d'anneaux transmis avec la lumière de l'autre moitié. Il suffira alors d'éloigner la plus forte des deux lumières d'une quantité telle que ces deux systèmes d'anneaux se détruisent exactement. Ces deux lumières se trouvant à la même hauteur angulaire relativement aux deux points éclairés du transparent qui fournissent les anneaux, on sera sûr qu'elles seront d'égale intensité pour un œil placé à l'écran. La détermination du rapport vrai de leurs intensités à même distance ne sera plus qu'une simple application des lois qui règlent la variation d'intensité de la lumière avec la distance.

191. Il ne sera pas inutile d'énumérer en terminant avec M. Billet les circonstances naturelles ou artificielles les plus remarquables dans lesquelles se produisent les anneaux colorés.

Les circonstances artificielles peuvent se rapporter à plusieurs types.

I. L'évaporation graduelle des liquides volatils étendus sur une plaque noire : les anneaux résultants sont irréguliers. La vapeur d'eau insufflée avec un tube sur un verre noir préalablement savonné, en donne de très réguliers. C'est précisément l'iriscope, dont M. Brewster, en 1841, attribue la découverte à M. Joseph Reade, et que M. Billet ne signale nullement, en 1833, comme un instrument nouveau.

II. L'extension des liquides visqueux, l'huile, par exemple, sur la surface noircie d'une eau exempte de toute matière graisseuse :

les anneaux donnés par ce procédé sont d'un ordre moins élevé à la circonférence qu'au centre, sans doute parce que la couche liquide est plus épaisse au centre. On rapporte à cette classe d'anneaux les couleurs naturelles qu'on observe à la surface de certaines fontaines; une huile empyreumatique selon les uns, de la silice selon les autres en serait la cause.

III. L'insufflation des liquides visqueux en bulles que l'on conserve par des procédés ingénieux. On peut y rattacher les bulles de verre et celles qui résultent de l'insufflation de la pelotte qu'on enlève en les éventrant aux vers à soie prêts à filer. Les petits ballons ainsi obtenus offrent en outre le phénomène d'une compacité qui contraste singulièrement avec la ténuité que suppose chez eux la production des anneaux; on s'est, en effet, assuré qu'ils conservent pendant plus de six semaines le plus subtil des gaz, l'hydrogène. La réussite de ces ballons est de la plus grande difficulté; il nous suffira de dire que l'habileté si patiente de feu Lebaillif a échoué dans cet essai.

IV. L'exfoliation de certaines substances, et entre autres de certains verres trop riches en alcali.

V. L'oxidation lente de certains métaux donne des couleurs qui se rapportent aux anneaux à centre blanc.

VI. Le dépôt à la surface des métaux de certains oxides ou sels, à l'aide de la pile ou autrement. Une découverte vraiment étonnante en ce genre est celle du célèbre physicien de Reggio, M. Nobili, enlevé trop tôt à la science. Tout le monde connait ses admirables échelles chromatiques, les dessins si variés, si riches des plus brillantes couleurs qu'il obtint en maniant avec une incomparable dextérité les électrodes en platine qu'il suspendait au-dessus de plaques d'acier plongées dans des solutions salines. Ce sont dans tout leur éclat les couleurs si pures du spectre solaire.

La circonstance naturelle la plus remarquable, sans contredit, par son immense généralité nous est offerte par les fleurs de la nature. La succession de leurs couleurs, identique avec celle qui résulterait d'épaisseurs incessamment variables et croissantes, ou bien d'une densité croissante sans changement d'épaisseur, est très favorable à l'opinion qui ramène leur coloration au phénomène des plaques minces. Un habile physicien a même cru remarquer que

les couleurs qui se succèdent pendant le développement de la force végétative montent dans l'ordre des anneaux, tandis que ces couleurs descendent dans l'ordre des anneaux quand cette force s'affaiblit.

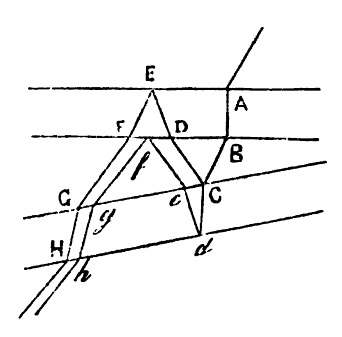
Couleurs des doubles surfaces à distance. — 182. Lorsqu'un rayon de lumière tombe sur deux plaques superposées, quelques unes des portions dans lesquelles il est subdivisé par des réflexions partielles et successives à la surface de séparation, sont souvent dans des conditions d'interférence, et donnent naissance à des phénomènes de couleur.

Ainsi, quand la lumière est transmise à travers deux plaques parallèles, dont les épaisseurs ne diffèrent pas d'une manière sensible, la couleur produite est la même que celle qui aurait pour cause la transmission à travers une plaque unique, dont l'épaisseur serait égale à la différence des épaisseurs des deux premières plaques; de plus, cette couleur est complétement indépendante de l'intervalle qui sépare les deux plaques. Ce phénomène fut observé d'abord par Nicholson; Young démontra qu'il résultait de l'interférence de deux faisceaux de lumière, dont l'un était deux fois réfléchi dans l'intérieur de la première plaque, et l'autre deux fois réfléchi dans le second milieu. Il est évident, en effet, que si e et e' sont les épaisseurs des deux plaques, le premier rayon aura parcouru dans le verre l'espace $3\,e + e'$, le second l'espace $3\,e' + e$, et comme ils parcourent le même chemin dans l'air, l'intervalle d'interférence est le temps employé à parcourir dans le verre le chemin $2\,(e - e')$.

M. Brewster a observé un cas semblable d'interférence produit par deux plaques d'égale épaisseur, qu'il inclinait d'une manière presque insensible: cette inclinaison compensait l'égalité d'épaisseur, en modifiant les chemins parcourus.

192. Dans ces deux cas, toutefois, les rayons interférents sont mêlés et comme dominés par la lumière directement transmise, de sorte que pour rendre les couleurs visibles il est nécessaire de recourir à divers expédients. Les phénomènes sont beaucoup plus accessibles avec la lumière réfléchie par deux plaques, lorsque par suite de l'inclinaison de ces deux plaques, elle est isolée de la lumière directe. Il est évident, en effet, que l'image directe d'un objet lumi-

neux vu à travers deux verres très peu inclinés est accompagnée de plusieurs images latérales formées par 2, 4, 6... réflexions. M. Brewster a remarqué que ces images étaient richement colorées. Les bandes de couleur sont parallèles à la ligne de jonction des deux verres, et leur largeur est d'autant plus grande que l'inclinaison est moindre. Les couleurs dans la première image latérale sont pro-



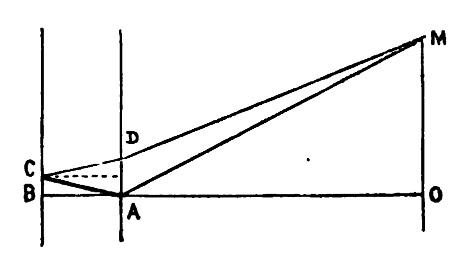
duites par l'interférence des deux faisceaux A B C D E F G H, A B C *d e f g h*, dans lesquels le rayon incident est décomposé par sa rencontre avec la seconde plaque ; un de ces faisceaux étant réfléchi intérieurement par la seconde plaque et extérieurement par la première, pendant que l'autre est réfléchi intérieurement par la seconde plaque et extérieurement par la première. Les chemins parcourus par ces deux faisceaux seraient évidemment égaux si les plaques étaient parallèles, et ne diffèrent qu'à cause de leur inclinaison.

Les deux cas précédents d'interférence peuvent être produits par des plaques de toute épaisseur.

193. Les phénomènes qu'on a désignés plus particulièrement sous le nom de couleurs des plaques épaisses, sont d'une tout autre nature et se manifestent dans des circonstances essentiellement différentes : ils furent d'abord observés par Newton. Dans l'expérience de ce grand physicien, un rayon de lumière transmis par une ouverture étroite était reçu sur un miroir concavo-convexe à surfaces parallèles et argenté sur sa surface postérieure. On fixe sur l'axe du miroir un écran de papier blanc percé d'une ouverture à son centre, pour laisser passer et repasser le rayon lumineux, et

l'on voit apparaître sur cet écran une série d'anneaux colorés, semblables aux anneaux transmis des plaques minces, mais plus larges. Le diamètre des anneaux varie en raison inverse de la racine carrée de l'épaisseur du miroir. Si l'on incline un peu le miroir, de manière à projeter l'image réfléchie sur l'un des côtés de l'ouverture, les anneaux se forment comme auparavant : mais leur centre est au milieu de la ligne qui joint l'ouverture à son image. Au-delà de ce centre se trouve une tache qui change d'apparence d'une manière remarquable, à mesure que l'image s'éloigne de l'ouverture; elle est alternativement obscure et brillante dans la lumière homogène; dans la lumière blanche elle prend tour à tour et avec rapidité toutes les gradations de teinte.

On a démontré que ce phénomène est produit par l'interférence des deux portions de lumière irrégulièrement disséminés par le passage et le repassage du rayon à travers la surface réfringente. Supposons que O soit l'ouverture à travers laquelle le rayon est intro-



duit, et que le rayon tombe perpendiculairement en A et en B sur la plaque réfléchissante, une portion de la lumière incidente sera irrégulièrement disséminée dans le passage du rayon OAB, à travers la première surface du miroir, et cette portion divergera, à partir du point A, dans toutes les directions. Soit AC, un des rayons dont se compose cette portion disséminée : il sera réfléchi dans la direction CD par la seconde surface, et sortira suivant DM. Mais le rayon direct AO, réfléchi de nouveau en B, sera encore disséminé en traversant de nouveau la seconde surface. Admettons que AM, un des rayons résultants de cette seconde dissémination, vienne rencontrer DM en M, et calculons la différence des chemins parcourus. Le dernier rayon a parcouru l'espace AB + BA dans

le verre et AM dans l'air, pendant que le premier a parcouru l'espace AC + CD dans le verre et DM dans l'air. La différence est donc le temps employé à parcourir dans l'air AM — DM, dans le verre 2 (AB — AC) ; et il est facile de prouver qu'en appelant a la distance OA du miroir à l'écran, e l'épaisseur AB du miroir, y la distance OM, ρ l'indice de réfraction, δ la différence cherchée on aura :

$$\delta = \frac{ey^2}{a(2e+\rho a)}$$

égalant cette différence à $\frac{n\lambda}{2}$, il viendra

$$\frac{n\lambda}{2} = \frac{ey^2}{a(2e+\rho a)}, \quad y^2 = n\lambda \frac{a(2e+\rho a)}{2e}.$$

Cette dernière équation détermine les distances des points auxquels se formeront les anneaux alternativement brillants et obscurs.

Si, comme cela arrive ordinairement, on suppose que a est très grand par rapport à e, on aura sensiblement

$$y^2 = \frac{n\lambda\rho a^2}{2e}$$

194. M. Babinet, qui suit avec gloire la direction que l'amitié de Fresnel avait imprimée à ses travaux, a ramené à un même point de vue théorique tous les phénomènes que nous venons de décrire; tous ont trouvé dans la théorie des ondulations une explication naturelle et facile. On trouvera ici avec plaisir une analyse du mémoire du savant académicien sur les couleurs des doubles surfaces à distance. Dans une série d'expériences sur la diffraction dans la lumière convergente, dont les phénomènes comme le calcul diffèrent essentiellement de ceux de la diffraction ordinaire, M. Babinet fut conduit à interposer une plaque transparente à faces parallèles sur le trajet des rayons convergents qui allaient au foyer d'une lentille former l'image d'un point lumineux unique placé à l'autre foyer conjugué. Le résultat de cette interposition, pour peu que les faces de la plaque fussent ternies ou couvertes de poussière, en un mot, rayonnantes, fut l'apparition d'anneaux concentriques,

sous l'incidence perpendiculaire, à l'image focale du point lumineux, anneaux dont le diamètre augmentait avec la distance de la plaque au foyer de la lentille et diminuait avec son épaisseur. Les couleurs des anneaux sont très nettes, quand les deux surfaces sont ternies avec de l'eau laiteuse, ou du vernis de dextrine. Autour du centre brillant, occupé par l'image focale, est un espace circulaire blanc qui se termine en anneau rouge, et ensuite en anneaux colorés, suivant l'ordre des anneaux de Newton. Si l'on incline la plaque, les anneaux cessent d'être concentriques à l'image focale : il se forme un anneau blanc dont la circonférence passe constamment par cette image. Cet anneau principal est accompagné intérieurement et extérieurement de plusieurs systèmes d'anneaux concentriques, dont les couleurs, à partir de l'anneau blanc, sont semblables à ce qu'étaient celles des anneaux autour du centre lumineux, dans le cas de l'incidence perpendiculaire : son centre est sur la direction de la perpendiculaire abaissée du foyer sur la plaque à faces parallèles.

Il est évident que ces anneaux sont produits par l'interférence des rayons émanés de la première surface par dissémination, et propagés tout alentour du foyer, avec les rayons qui sont disséminés seulement à la sortie de la plaque et par la seconde surface. Chacun des points voisins du point lumineux focal reçoit alors une infinité de doubles rayons, que le calcul démontre être simultanément tous d'accords ou tous en opposition, deux à deux, suivant la distance de ce point à l'image focale.

Pour mieux analyser ce phénomène, il fallait le simplifier, et arriver à n'avoir que deux rayons interférents au lieu d'une infinité. Pour y parvenir, M. Babinet forma une ligne lumineuse au foyer d'une lentille cylindrique, et reçut la lumière divergente sur deux fils métalliques polis, tendus parallèlement entre eux et à la ligne lumineuse. Il faut, dans ce cas, que les trois lignes soient presque dans le même plan ; autrement, on serait obligé de ne mettre que peu de distance entre les deux fils destinés à disséminer la lumière. Si l'on place ensuite l'œil ou le foyer de la loupe oculaire en un point tel que la somme des distances de la ligne lumineuse à l'un des fils, plus la distance de ce fil à l'œil, soit égale à la distance de la ligne lumineuse au second fil, plus la distance de ce fil à l'œil ; il est

évident qu'alors l'œil et la ligne lumineuse sont aux deux foyers d'une ellipse dont le grand axe est la somme des distances indiquées. A ce point et dans les points voisins, les rayons réfléchis par les deux fils interférents donnent des franges perceptibles si l'angle qu'ils forment entre eux n'est pas trop grand.

L'expérience de Newton, que nous avons décrite et expliquée plus haut, se lie à l'expérience fondamentale que nous venons d'indiquer. On passe, en effet, de l'une à l'autre en observant comme nous l'avons fait, que dans l'expérience de Newton le miroir rend les rayons convergents, après qu'ils ont traversé la première surace, et qu'ils traversent de nouveau cette première surface, après leur réflexion sur le miroir, et que les couleurs sont produites par l'interférence des rayons disséminés à la première surface du miroir de verre et réfléchis régulièrement par la surface concave avec ceux qui ne sont disséminés qu'à leur retour du miroir ; les uns et les autres ayant parcouru deux fois la distance du point lumineux à la surface antérieure du miroir et deux fois l'épaisseur de la plaque épaisse que forme celui-ci.

Le duc de Chaulnes observa des anneaux semblables à la surface d'un miroir couvert d'une légère pellicule de lait, desséchée de manière à former une couche semi-transparente, ou d'une mousseline ou gaze très fine.

Sir William Herschel parle, dans les *Transactions philosophiques* de 1807, d'anneaux qu'on obtient en répandant de la poudre d'amidon dans l'air, devant un miroir métallique, et en interceptant le rayon réfléchi au moyen d'un écran. La théorie des interférences, appliquée comme l'a fait M. Babinet, rend facilement compte de ces phénomènes.

Elle explique encore une expérience de M. Pouillet, laquelle, comme M. Biot le fait remarquer, embarrasse beaucoup dans l'hypothèse de l'émission. Devant un miroir métallique concave, à une distance convenable, on place le bord rectiligne d'un écran, et l'on obtient par réflexion des anneaux circulaires au foyer ordinaire du miroir, ce qui est une circonstance extraordinaire. Ces anneaux ne dépendent que des systèmes individuels de doubles rayons revenant à l'écran ; l'éclat seul des anneaux dépend de leur nombre ; un fil rectiligne, aussi bien que le bord d'un écran, en donnerait encore

qui seraient aussi circulaires et de même diamètre, si la distance du fil au miroir était la même que celle du bord rectiligne de l'écran. Il ne peut rester aucun doute sur l'explication de ce fait singulier.

Si l'on ternit une glace ordinaire d'appartement en soufflant légèrement dessus, ou bien en y faisant adhérer un peu de poussière ou de sciure de bois (il faut éviter le lycopode et les poussières à grains égaux, qui donnent d'autres anneaux à cause de cette égalité même), on voit de part et d'autre de l'image de la lumière d'une bougie que l'on regarde dans la glace, en la tenant près de l'œil et un peu de côté, une belle série de franges courbes colorées, dans lesquelles la flamme occupe le milieu d'une bande blanche, escortée de part et d'autre de franges colorées à couleurs récurrentes. Il est aisé de voir que ces franges naissent des rayons qui ont traversé deux fois l'épaisseur de la glace; les uns disséminés en entrant, et revenant après la réflexion dans une direction autre que celle de la réflexion principale, et les autres disséminés à leur retour du fond de la glace par la même surface, et coïncidant en direction avec les premiers. Cette expérience est due à M. Quételet.

Les formules déduites de la théorie des ondulations sont dans tous les cas faciles à obtenir; les distances calculées s'accordent parfaitement avec les mesures obtenues. Les différences sont toujours comparables aux erreurs d'observation; chaque nouvelle expérience, chaque nouveau calcul devient une preuve nouvelle et efficace de la vérité de cette belle théorie, une difficulté insurmontable dans l'hypothèse de l'émission.

Couleurs des plaques mixtes. — 195. Si l'intervalle entre deux verres est rempli avec différentes substances, de l'eau et de l'air, par exemple, de l'eau et de l'huile très divisée; les portions de lumière qui les traverseront seront dans des conditions d'interférence, et la différence des chemins parcourus ou l'intervalle d'interférence dépendra de la différence entre les vitesses de la lumière dans les deux milieux. Si donc alors on regarde un objet lumineux à travers ces verres, on verra des anneaux colorés semblables à ceux qu'on voit ordinairement par transmission, mais beaucoup plus larges. Si un objet obscur se trouve derrière les lentilles, et si la lumière incidente est quelque peu oblique, les anneaux colorés changent immédiatement de caractère, et ressemblent à ceux qui sont communé-

ment produits par réflexion : une des portions, dans ce cas, est réfléchie et perd par conséquent une demi-ondulation.

Ces phénomènes ont été observés et expliqués par Young, qui les a désignés sous le nom de couleurs des plaques mixtes. Cet illustre physicien a encore observé de semblables phénomènes de couleur dans des milieux indéfinis. Ainsi, quand on mêle avec l'eau de la poussière de lycopode, ce mélange vu au moyen de lumière directe ou par transmission a une teinte verte, tandis que sa teinte devient pourpre s'il est vu au moyen de la lumière indirecte ou par réflexion. Les tons de ces deux couleurs montent, chacun dans sa série, si l'on rend plus petite la différence entre les pouvoirs réfringents, en ajoutant du sel à l'eau. L'intervalle d'interférence dépend dans ce cas de la grandeur des particules transparentes.

Dans la première des expériences que nous venons de rappeler, on voit autour de la bougie que l'on regarde à travers la plaque mixte, le champ des deux verres teint d'une couleur plus faible, et complémentaire de la couleur de la bougie. Ce fait a été observé par M. Babinet, qui en demanda au célèbre Young la cause encore inconnue. Le même savant a remarqué que les couleurs des lames mixtes diffèrent de celles des lames minces, en ce que celles-ci, dans les incidences obliques, sont polarisées suivant le plan d'incidence, tant pour les anneaux transmis que pour les anneaux réfléchis ; ce qui n'a pas lieu pour les couleurs des lames mixtes, transmises obliquement, lesquelles sont polarisées partiellement, comme par transmission, c'est-à-dire perpendiculairement aux plans d'incidence, de réflexion ou de transmission qui coïncident ici. Ajoutons encore que les couleurs des lames mixtes n'ont pas besoin, comme celles des anneaux ordinaires, d'être placées à la distance de la vue distincte ; que les deux rayons interférents n'ayant pas en général la même intensité, il ne peut y avoir destruction complète d'aucune couleur ; ce qui veut dire que toutes les teintes sont plus ou moins mêlées de blanc, et qu'enfin pour les anneaux réfléchis des plaques mixtes, le centre est blanc, contrairement à ce qu'on observe dans les anneaux ordinaires, à cause de la perte connue d'un demi-intervalle d'interférence.

La théorie des plaques mixtes rend compte d'un phénomène rare et curieux, le soleil bleu. Le disque de cet astre est dans certaines

circonstances d'un bleu de bonne teinte, un peu mêlé de blanc. M. Babinet affirme qu'il faut attribuer ces couleurs à l'interférence des rayons qui ont traversé les vésicules d'eau ou de vapeur, avec celles qui ont passé à travers l'air seulement. Le phénomène suppose uniquement que la partie de chaque vésicule traversée ne soit pas trop épaisse, ce qu'il est facile d'admettre *à priori*.

Pour reproduire le soleil bleu, rouge, violet même, M. Babinet prend deux verres plans circulaires, séparés par une couche mixte d'eau et d'air, d'huile et d'air, enfin d'huile et d'eau. En rapprochant convenablement les verres, on rend une bougie vue au travers d'une teinte uniforme rouge, bleue, violette, à volonté : l'image affaiblie du soleil réfléchie par l'eau, et la lune vues à travers les deux plaques, prennent successivement les mêmes couleurs.

On arrive facilement à donner à la lame mixte la couleur convenable en tournant les deux verres l'un sur l'autre, avec l'aide d'une pression modérée et d'un peu de chaleur.

Il nous reste à examiner, dans un dernier article, les deux systèmes rivaux dans leurs rapports avec un dernier phénomène qui se modifie à l'infini : la polarisation circulaire. Ce sera pour la théorie des ondulations un triomphe plus éclatant encore.

Polarisation circulaire et chromatique. — 196. Nous réunirons sous ce titre l'ensemble des phénomènes qui se manifestent lorsqu'un rayon polarisé est transmis à travers des substances douées d'une structure cristalline. Parmi tous les phénomènes d'optique, ceux-ci sont probablement les plus magnifiques ; et si l'on remarque de plus qu'en nous révélant la structure intime des corps, le mode d'arrangements moléculaires qui les constitue, ils nous font comme pénétrer dans le laboratoire de la nature pour lui arracher ses secrets, il sera facile de comprendre que le sujet qui va nous occuper doit par son importance être placé au premier rang.

Les premières découvertes dans ces régions si attrayantes de la science ont été faites par M. Arago. Il les exposa dans un mémoire présenté à l'Institut en 1811, et qui avait pour objet les couleurs que présentent les plaques cristallines, lorsqu'on les éclaire avec de la lumière polarisée. Ces recherches ont été poursuivies depuis avec une ardeur qui ne s'est jamais ralentie par les physiciens les

plus illustres, et surtout par MM. Biot, Seebeck, Brewster et Fresnel.

Nous avons déjà dit que lorsqu'un rayon de lumière polarisé par réflexion rencontre sous l'angle de polarisation une seconde surface réfléchissante, il n'est pas réfléchi, si le second plan d'incidence est perpendiculaire au premier. La première surface réfléchissante ou le premier plan réflecteur a reçu le nom de *plaque polarisante* ou *plan réflecteur;* la seconde, par des raisons que nous énumérerons plus tard, a été appelée *plan analysant* ou *analyseur.* Cela posé, si entre les deux plans on interpose une plaque prise dans une substance doublement réfringente, et qu'on oblige le rayon polarisé à traverser la plaque, la faculté de se réfléchir lui est instantanément rendue, une certaine quantité de lumière, plus ou moins abondante suivant la nature du cristal interposé, sera réellement réfléchie. On dit dans ce cas que le rayon a été dépolarisé par le cristal. Ce fut par ce moyen que Malus mit en évidence le pouvoir doublement réfringent d'un très grand nombre de substances, pouvoir qu'on n'avait pu observer directement, parce que la séparation des deux rayons était trop peu sensible.

197. Pour mieux analyser le phénomène que nous venons de rappeler, supposons que la plaque cristalline soit placée de telle sorte que le rayon polarisé la rencontre perpendiculairement, et faisons-la tourner dans son plan. Nous observerons alors qu'il y a deux positions de la plaque, qui sont telles que la lumière disparaît totalement, absolument comme si le rayon réfléchi s'évanouissait, ou comme si le cristal n'avait pas été interposé. Ces deux positions sont perpendiculaires l'une à l'autre; ce sont précisément celles dans lesquelles la section principale du cristal coïncide avec le plan de la première réflexion, ou lui est perpendiculaire. Si l'on fait tourner la plaque à partir de l'une de ces positions, la lumière augmente graduellement jusqu'à ce qu'elle atteigne son maximum, ce qui arrive quand la section principale fait un angle de 45° avec le plan de la première réflexion.

Dans ces expériences, la lumière réfléchie est blanche; mais si la plaque cristalline interposée est assez mince elle se revêt des plus splendides couleurs, et ces couleurs varient avec l'inclinaison de la plaque par rapport au rayon polarisé. Le mica et le sulfate

de chaux sont éminemment propres à la production de ce brillant phénomène, parce qu'on les amène facilement par le clivage à une ténuité convenable. Si l'on dispose une plaque mince de l'une de ces deux substances de sorte qu'elle reçoive perpendiculairement le rayon polarisé, et qu'on la tourne dans son propre plan, la lumière variera seulement d'intensité sans changer de couleur. La couleur s'évanouira également lorsque la section principale du cristal coïncidera avec le plan primitif de polarisation, ou lui sera perpendiculaire, et atteindra son maximum quand l'angle compris entre la section principale et le plan de polarisation sera égal à 45°.

D'autre part, si l'on fixe le cristal, et qu'on tourne le plan analyseur de manière à faire varier l'angle que le second plan de réflexion fait avec le premier, le rayon passera à travers toutes les nuances de même teinte, de la couleur qu'il avait à la couleur complémentaire, de sorte qu'on pourra constater à chaque instant que la lumière réfléchie dans une position donnée de l'analyseur est, sous le double rapport de la couleur et de l'intensité, complémentaire de la lumière qui était réfléchie dans une première position distante de la seconde de 90°. Cette curieuse relation sera rendue plus évidente, si l'on substitue au plan analyseur un prisme doublement réfringent; car alors les deux rayons réfractés par le prisme ont pour plan de polarisation : l'un, la section principale du prisme; l'autre, un plan perpendiculaire à cette même section; de sorte qu'ils sont absolument dans la même condition que les deux rayons réfléchis par l'analyseur dans des positions situées à 90° l'une de l'autre. On voit à la fois de cette manière les deux couleurs complémentaires, et il est facile de les comparer. Il y a plus : la comparaison peut être faite immédiatement, si l'on dispose l'appareil de telle sorte que les deux images colorées empiètent l'une sur l'autre; car alors, quelles que soient leurs teintes, considérées isolément, on verra que la portion où elles se superposent est absolument blanche, ce qui est le caractère distinctif des couleurs complémentaires.

198. Si l'on interpose entre les plans de réflexion et d'analyse des plaques de différentes épaisseurs, et qui toutes reçoivent perpendiculairement le rayon polarisé, on verra que la teinte varie avec l'épaisseur. Les couleurs produites par des plaques taillées pa-

rallèlement dans le même cristal, et qui ne diffèrent que par l'épaisseur, suivent de fait les mêmes lois que les couleurs réfléchies par les lames d'air très minces ; la teinte s'élève dans l'échelle chromatique à mesure que l'épaisseur diminue, jusqu'à ce qu'elle disparaisse entièrement, quand l'épaisseur a été réduite au-dessous de certaines limites; l'espace central apparait alors noir, absolument comme si l'on avait enlevé le cristal.

Les épaisseurs qui produisent les teintes correspondantes sont beaucoup plus grandes pour les plaques cristallines exposées à la lumière polarisée que pour les lames d'air ou d'un autre milieu homogène isophane. Le noir du premier ordre apparait pour la chaux sulfatée, lorsque l'épaisseur est $\frac{1}{2000}$ de pouce. L'on obtient l'échelle entière de Newton entre des épaisseurs qui sont des fractions du pouce représentées par $\frac{1}{2000}$ et $\frac{1}{50}$. Si l'épaisseur dépasse 1/50e, la lumière transmise est toujours blanche. La teinte produite par une lame de mica dans la lumière polarisée est la même que celle qui serait réfléchie par une lame d'air quatre cents fois plus petite.

En examinant les mêmes phénomènes sous des incidences obliques, M. Biot trouva que dans les cristaux uni-axes la teinte développée ou mieux le nombre de périodes ou de parties de périodes correspondant à un rayon d'une réfrangibilité donnée était déterminé par le produit que l'on obtient quand on multiplie le chemin parcouru par la lumière dans le cristal par le carré du sinus de l'angle que sa direction fait avec l'axe optique. Dans les cristaux à deux axes, il faut substituer au carré du sinus le produit des sinus des angles que le rayon fait avec les deux axes.

199. Arrivons à la théorie physique de ces phénomènes, et cherchons à les expliquer.

Nous avons vu que tout rayon qui pénètre une plaque cristalline est divisé en deux autres, différents de vitesse et de direction, ou, dans le langage propre à la théorie des ondulations, que l'onde incidente donne naissance dans l'intérieur du cristal à deux systèmes d'ondes qui se propagent dans des directions et avec des vitesses différentes. Une de ces ondes, par conséquent, reste en arrière de l'autre, et à leur émergence ou sortie elles sont dans des

phases différentes de vibration. Si la plaque est mince, le retard de l'une des ondes sur l'autre peut n'être que d'un petit nombre d'ondulations ou de fractions d'ondulation, et il est évident dès lors qu'elles pourront se trouver dans des conditions convenables d'interférence et par suite de production de couleurs. Ce mode d'explication, qui n'était encore qu'une pure conjecture, s'offrit d'abord à l'esprit pénétrant d'Young.

Mais une grande difficulté vient nous arrêter tout-à-coup. Si cette explication était vraie et fondée en principe, les phénomènes d'interférence et de couleurs devraient se produire par le seul passage du rayon à travers le cristal, sans l'intervention des plans réflecteur et analyseur. Or, il n'en est pas ainsi. La difficulté change dès lors de nature ; il ne s'agit plus d'expliquer pourquoi le phénomène se produit quelquefois; il faut, au contraire, dire pourquoi il ne se produit pas toujours.

Pour préparer la solution de cette grande difficulté, il faut d'abord remarquer que les rayons dont nous supposions que l'interférence produisait les faits observés ne sont pas dans les mêmes conditions que les rayons qui, par leur interférence, donnent naissance aux couleurs des plaques minces; ils sont polarisés, et qui plus est, polarisés dans des plans opposés ou à angles droits. Or, il résulte, comme nous l'avons dit, des recherches de MM. Fresnel et Arago : 1° que deux rayons polarisés à angle droit n'interfèrent pas; 2° qu'on peut les ramener au même plan de polarisation sans qu'ils interfèrent encore; 3° que deux rayons polarisés à angle droit et ramenés ensuite au même plan de polarisation interfèrent seulement lorsqu'ils appartiennent à un faisceau polarisé primitivement en entier dans un seul plan; 4° que dans les phénomènes relatifs à l'interférence des rayons qui ont subi la double réfraction, le lieu des franges n'est pas déterminé uniquement par la différence des chemins parcourus ou des vitesses; qu'il faut dans certaines circonstances tenir compte d'une demi-ondulation qui a été comme perdue. Nous trouvons facilement dans ces lois la raison des faits qui nous ont embarrassé. Et d'abord pour expliquer mécaniquement la nécessité du plan polarisant, ou la non-interférence des deux rayons, lorsque la lumière qui tombe sur le cristal n'est pas polarisée, il suffit de rappeler que tout rayon de lumière ordinaire

peut être considéré comme formé de deux rayons d'intensités égales, polarisés à angle droit, et dont les vibrations, par conséquent, sont perpendiculaires l'une à l'autre (1). En effet, chacune de ces vibrations est décomposée dans l'intérieur du cristal en deux autres qui sont décomposées à leur tour dans le plan de réflexion par la plaque analysante, et produisent le phénomène d'interférence. Mais l'intervalle d'interférence dans les deux cas sera d'une demi-ondulation; les teintes produites seront dès lors complémentaires, et la lumière résultant de leur ensemble sera blanche (2); on ne verra aucune apparence de couleurs : il faut donc nécessairement que la lumière incidente soit polarisée.

Le plan analysant est non moins nécessaire à la production des interférences et des couleurs; car les deux rayons qui sortent de la lame cristalline étant polarisés à angle droit, ne pourront interférer

(1) Plus exactement, un rayon de lumière ordinaire doit être considéré comme composé d'un nombre indéfini de rayons polarisés dans tous les azimuths, de telle sorte que si l'on prend deux plans quelconques à angle droit, il y ait dans chacun de ces plans une égale quantité de lumière actuellement polarisée. La lumière ordinaire, en effet, consiste dans une série de systèmes d'ondes dans chacun desquels les vibrations sont différentes : ces différents systèmes se succèdent l'un à l'autre si rapidement, que, dans un temps fini, il se produit autant de vibrations dans un plan que dans le plan qui lui serait perpendiculaire. Cependant les phénomènes d'interférence que présente la lumière ordinaire nous forcent d'admettre, comme l'a fait observer M. Airy, que les vibrations ne changent pas continuellement de vitesse et d'amplitude, et que dans chaque système d'ondes il y a probablement plusieurs centaines de vibrations parfaitement semblables, ce qui n'empêche pas que les vibrations d'un système n'aient aucune relation avec celles des autres, et que ces systèmes se succèdent avec une telle rapidité que toute trace de polarisation disparait nécessairement.

(2) Nous avons supposé ici que la lumière résultante est simplement la somme des lumières provenant de chacune des portions dans lesquelles le rayon primitif avait été décomposé, sans tenir compte de leur phase. La vérité de cette supposition dépend du fait que nous avons fait ressortir dans la note précédente, et qui consiste en ce que les deux rayons polarisés à angle droit dans lesquels on suppose que la lumière commune est décomposée, présentent une différence de phase continuellement variable. Il doit en être par conséquent de même des composantes finales, de sorte qu'on doit les regarder comme des rayons provenant de sources différentes, et donnant par conséquent une lumière résultante dont l'intensité soit égale à leur somme.

qu'autant que l'action de la plaque analysante les ramènera au même plan de polarisation.

Quand donc on tient compte des lois que nous venons de rappeler, toute difficulté disparait, l'explication du phénomène qui nous embarrassait devient évidente. Le rayon primitivement polarisé dans un seul plan, par le moyen de la première plaque polarisante, d'une première tourmaline, par exemple, est partagé dans le cristal en deux autres polarisés à angle droit; ces deux rayons sont finalement ramenés par la seconde plaque polarisante, une seconde tourmaline, par exemple, au même plan de polarisation; ils pourront donc interférer, et le produit de leur interférence dépendra du retard de l'un des rayons par rapport à l'autre : ce retard lui-même a pour cause la différence de vitesse des deux rayons dans leur passage à travers le cristal.

200. Nous avons montré, dans un paragraphe précédent, que la différence entre les rapports inverses des carrés des vitesses avec lesquelles les deux rayons cheminent dans le cristal, est proportionnel au produit des sinus des angles que leurs directions font avec les axes optiques, de sorte que si v et v' sont ces vitesses, ω et ω' les angles qu'elles font avec les deux axes optiques, on aura :

$$\frac{1}{v^2} - \frac{1}{v'^2} = c \sin \omega \sin \omega'.$$

Mais si t et t' sont les temps employés par les deux rayons pour traverser le cristal, suivant l'épaisseur E, qui sera le produit de l'épaisseur réelle e de la plaque, par la sécante de l'angle de réfraction, on aura aussi :

$$\frac{1}{v^2} - \frac{1}{v'^2} = \frac{t^2 - t'^2}{E^2} = \frac{t + t'}{E} \cdot \frac{t - t'}{E}.$$

Le premier facteur du produit qui forme le second membre est sensiblement constant, car les temps t et t' sont sensiblement proportionnels à l'épaisseur E; on aura donc :

$$t - t' = c\, E \sin \omega \sin \omega',$$

c'est-à-dire que l'intervalle d'interférence ou le retard sera proportionnel au produit que l'on obtient quand on multiplie l'épaisseur



suivant laquelle la plaque est traversée par le produit du sinus que la direction du rayon fait avec les axes optiques. Si ces axes coïncident, ou si le cristal est uni-axe, l'intervalle d'interférence sera proportionnel au carré du sinus de l'angle que la direction du rayon fait avec l'axe. On sait d'ailleurs que la teinte est proportionnelle à l'intervalle d'interférence; la loi découverte expérimentalement par M. Biot, et suivant laquelle la teinte est proportionnelle au produit de l'épaisseur traversée par le carré du sinus ou le produit des sinus, découle donc immédiatement de la théorie.

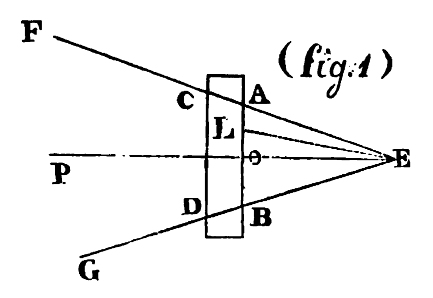
201. Il va sans dire que la lumière qui sort du cristal est en général elliptiquement polarisée, puisqu'elle résulte de deux ondes dans lesquelles les vibrations sont à angle droit, et qui ont des phases différentes. Dès lors, si l'on se sert de lumière homogène, et si l'on analyse le rayon émergent avec un prisme doublement réfringent, les deux faisceaux dans lesquels il est subdivisé varieront d'intensité avec la rotation du prisme, sans qu'en général l'un et l'autre s'évanouissent. Si cependant l'épaisseur du cristal est telle que la différence de phase des deux rayons soit un nombre exact de demi-ondulations, ils formeront à leur sortie un rayon polarisé rectilignement, et dont le plan de polarisation coïncidera avec le plan primitif de polarisation, ou fera avec la section principale du cristal le même angle que le plan primitif de polarisation, mais en étant situé du côté opposé. Un des rayons par conséquent dans lesquels ce rayon est divisé par le prisme analysant, s'évanouira dans deux positions de la section principale, et il est évident que les épaisseurs successives de la plaque cristalline qui produiront le même effet formeront une progression arithmétique. D'un autre côté, si la différence de phase est égale à un quart de la longueur d'ondulation, ou un multiple impair de ce quart, et si en même temps la section principale du cristal est inclinée de 45° sur le plan primitif de polarisation, le rayon émergent sera polarisé circulairement. C'est un des plus simples moyens d'obtenir un rayon doué de la polarisation circulaire; mais il a ce désavantage que l'intervalle de phase exigé ne peut être rigoureusement exact que pour des ondes d'une longueur particulière, et que par suite la polarisation circulaire n'est parfaite que pour une couleur déterminée.

202. Nous avons vu que le phénomène de couleur n'est produit

que lorsque le cristal est mince. Avec des plaques épaisses, pour lesquelles la différence des phases des deux rayons renferme un grand nombre de longueurs d'ondes, les teintes des divers ordres se superposent, comme cela arrive pour les anneaux de Newton quand la couche d'air est trop épaisse, et la lumière résultante est blanche.

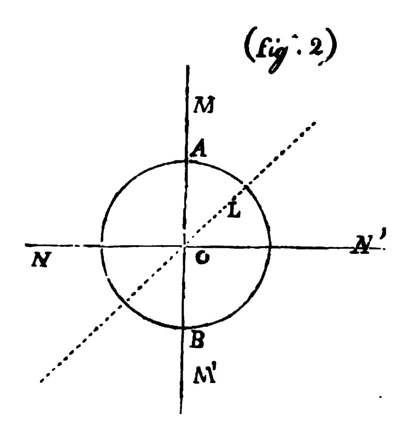
On peut cependant ramener alors même ces couleurs, en superposant deux plaques, de telle sorte que le rayon qui, dans la première, avait la plus grande vitesse, ait la plus petite dans la seconde. Il suffit, pour cela, de fairè que les cristaux aient leurs sections principales perpendiculaires ou parallèles suivant que les substances employées sont de même nom ou de noms opposés. Si toutes deux sont des cristaux positifs, il faudra rendre leurs sections principales perpendiculaires; elles devront être parallèles si l'un des cristaux est positif et l'autre négatif. La raison de cette disposition est évidente.

203. Considérons maintenant les effets produits lorsqu'un rayon traverse un cristal uni-axe dans diverses directions faisant toutes avec l'axe optique un petit angle, et supposons pour plus de simplicité que la plaque cristalline a été taillée perpendiculairement à l'axe. Supposons que A B C D est la plaque, et E la position de l'œil.



La portion visible du rayon émergent formera un cône A E B, dont le sommet coïncide avec l'œil, et l'axe avec l'axe optique du cristal. Le rayon qui traverse le cristal dans la direction de l'axe POE n'éprouvera aucune modification; il sera par conséquent réfléchi ou non réfléchi par la plaque analysante, suivant que le dernier plan de réflexion sera parallèle ou perpendiculaire au plan de polarisation primitif. Mais les autres rayons dont se compose le

cône seront modifiés dans leur passage à travers le cristal ; le changement qu'ils éprouveront dépendra de leur inclinaison sur l'axe optique et de la position de la section principale par rapport au plan primitif de polarisation.

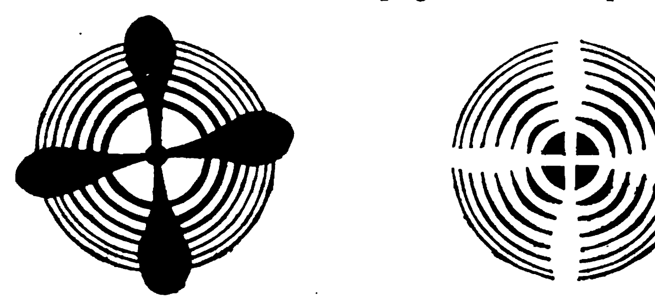


Supposons que le cercle ci-joint représente la section du cône des rayons émergents par la seconde surface du cristal, et menons par son centre O deux droites perpendiculaires MM′, NN′, dont l'une soit l'intersection de la surface par le plan primitif de polarisation. Le rayon qui émergera de l'un quelconque des points de ces lignes ne sera point partagé dans l'intérieur du cristal, et son plan de polarisation ne changera pas, parce que pour tous ces rayons la section principale du cristal coïncide dans un cas avec le plan primitif et lui est perpendiculaire dans l'autre. Ces rayons, par conséquent, seront ou ne seront pas réfléchis par l'analyseur, suivant que le plan de seconde réflexion coïncidera avec le plan de première réflexion, ou lui sera perpendiculaire. Dans le dernier cas, par conséquent, une croix noire couvrira le champ de la vision ; ce sera dans le second cas une croix blanche.

Mais il en est autrement des rayons qui comme CL émergent des points situés au-dehors des perpendiculaires. Pour ces rayons, la section principale du cristal ne coïncide pas avec le plan de polarisation et ne lui est pas perpendiculaire, et par conséquent le rayon polarisé incident sera divisé dans l'intérieur du cristal en deux autres dont les plans de polarisation seront respectivement parallèles

et perpendiculaires à CL. Les vibrations dans ces deux rayons seront ramenées au même plan par la plaque analysante ; ils interféreront donc, et l'étendue de leur interférence dépendra de leur différence de phases.

Cette différence de phase varie avec l'intervalle d'interférence ou le retard : si cet intervalle est un multiple pair de la demi-ondulation, ces deux rayons seront en complet désaccord et se détruiront ; ils seront, au contraire, en complet accord, et leurs intensités s'ajouteront si l'intervalle d'interférence est un multiple impair de la demi-longueur d'onde. Nous avons vu que pour une plaque donnée le retard est proportionnel au carré du sinus de l'angle que le rayon fait avec l'axe optique : or, il est facile de voir que le sinus est à très peu près proportionnel au sinus de l'angle L E O (fig. 1) que le rayon émergent fait avec l'axe, et que ce dernier sinus est lui-même proportionnel à L O, distance du centre au point d'émergence. L'intervalle d'interférence ou le retard varie donc comme le carré de cette distance, et par conséquent les lignes successivement brillantes ou obscures seront disposées en cercles tels que les carrés de leurs rayons LO formeront une progression arithmétique.

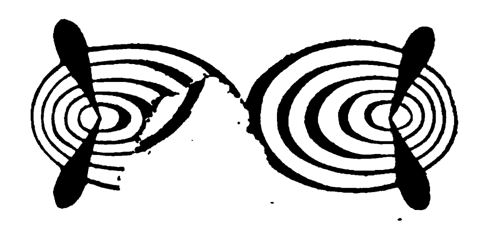


Nous n'avons jusqu'ici parlé que de lumière homogène ; si l'on emploie de la lumière blanche ou composée, les anneaux de différentes couleurs seront en partie superposés, et il en résultera une série d'anneaux colorés des couleurs de l'iris, et séparés par des intervalles obscurs. Le phénomène [illegible]eption de la croix, est en tout semblable à celui des anneau[illegible] Newton ; tous deux, on le voit, sont une conséquence d'un [illegible] principe éminemment fécond, le principe des interférences. Ces anneaux apparaissent même dans des cristaux épais, parce que la différence de vitesse

des deux rayons est très petite pour des rayons peu inclinés sur l'axe optique.

204. Considérons brièvement ce qui arrive dans les cristaux bi-axes. Concevons que l'on taille dans un semblable cristal une plaque perpendiculaire à la bissextrice des axes optiques, et interposons-la comme tout-à-l'heure entre les plaques analysante et polarisante.

Les bandes brillantes et obscures ne seront plus disposées en cercles, comme dans le premier cas, mais elles formeront des courbes symétriques relativement aux lignes menées par l'œil dans la direction des deux axes. Les points d'une même bande seront ceux pour lesquels l'intervalle d'interférence ou le retard $t - t'$ des deux rayons sera constant. Or, nous avons vu que cet intervalle est proportionnel au produit des sinus des angles que la direction du rayon fait avec les axes optiques, et ces sinus sont eux-mêmes sensiblement proportionnels aux distances mesurées sur la face du cristal, du point d'émergence aux projections des axes optiques. Le produit de ces deux distances devra donc être constant pour tous les points d'une même courbe, et il en résulte que cette courbe sera la lemniscate de Jean Bernouilli, dont la propriété fondamentale est que le produit des deux rayons vecteurs menés de l'un quelconque de ses points à deux pôles fixes est une quantité constante. L'exactitude de cette loi a été vérifiée de la manière la plus complète, à l'aide de mesures prises avec le plus grand soin par sir John Herschell. La constante qui est proportionnelle à l'intervalle d'interférence varie d'une courbe à l'autre, et croît pour les diverses bandes obscures successives comme la série naturelle des nombres. Pour différentes plaques d'une même substance, elle varie en raison inverse de l'épaisseur.





La forme des pinceaux obscurs qui croisent le système entier d'anneaux est déterminée par la loi qui fixe la position du plan de polarisation du rayon émergent. On montre facilement, en partant des lois établies par Fresnel, que deux courbes sombres semblables passent en général par chacun des pôles de la lemniscate, et que ces courbes sont des hyperboles rectangulaires dont le centre commun est le point milieu de la ligne qui joint les projections des deux axes.

205. *Polarisation rotatoire ou mobile.* — Dans la série de phénomènes que nous venons d'étudier, le plan de polarisation du rayon restait invariable, à moins qu'il ne vînt à subir une nouvelle réflexion ou réfraction. Nous n'avons pas supposé que ce plan variât à chaque instant dans l'intérieur du cristal. Il est cependant des cas où il n'en est point ainsi, et où le plan de polarisation tourne incessamment pendant toute la marche du rayon, quelquefois de gauche à droite, comme l'aiguille d'une horloge, quelquefois dans la direction opposée.

Ce phénomène remarquable a été d'abord observé par M. Arago, à qui revient l'honneur de cette brillante découverte; il lui apparut dans le cristal de roche, la seule substance solide qui jouisse de cette propriété. Pour bien comprendre la différence fondamentale qui existe entre ce cristal et les autres, il faut remarquer que si un rayon polarisé d'une couleur simple traverse une plaque de spath d'Islande, de béril ou de tout autre cristal uni-axe, dans la direction de son axe, il n'éprouve aucun changement; mais que s'il traverse de la même manière une plaque de cristal de roche, son plan de polarisation sera modifié à la sortie: dans quelques cristaux, il aura tourné de gauche à droite, dans d'autres il aura tourné en sens

opposé. On dit que le cristal est *dextrogyre* ou *lévogyre*, suivant que la rotation a lieu dans le premier sens ou dans le second.

196. Les phénomènes de la polarisation rotatoire ont été étudiés par M. Biot avec une très grande habileté et un très grand succès; il les réduisit aux lois suivantes :

I. Pour différentes plaques, prises dans le même cristal, la rotation du plan de polarisation est toujours proportionnelle à l'épaisseur de la plaque; il en est de même à très peu près pour des plaques taillées dans différents cristaux.

II. Si deux plaques sont superposées, l'effet produit sera à très peu près le même que si l'on avait employé une seule plaque, dont l'épaisseur serait la somme ou la différence des deux premières, suivant que leurs pouvoirs rotatifs seront ou non de même nature.

III. La rotation du plan de polarisation est vraiment différente pour les différents rayons du spectre; elle croît avec la réfrangibilité. Pour une plaque donnée, l'arc qui mesure la rotation est en raison inverse du carré de la longueur d'onde. Ainsi, l'arc décrit par l'action d'une plaque, ayant un millimètre d'épaisseur, est de 11° $\frac{1}{2}$ pour le rouge extrême du spectre, de 30° pour le rayon de réfrangibilité moyenne, de 44° pour le violet extrême.

Puisque les rayons de réfrangibilités différentes sortent polarisés dans des plans différents, il en résulte que si un rayon de lumière blanche tombe sur un cristal, et est reçu à son émergence par l'analyseur, il y aura une certaine portion de lumière réfléchie dans toutes les positions du dernier plan de réflexion, et que cette portion sera teinte de très belles couleurs, qui varieront avec l'épaisseur de la plaque et la position du plan analyseur. Ce plan réfléchira les rayons de diverses couleurs dans différentes proportions dépendantes de la position de leur plan de polarisation par rapport au plan de la seconde réflexion, et la couleur résultante sera une teinte composée qu'on déterminera facilement dans tous les cas.

206. Cette distinction curieuse entre les divers échantillons de cristaux de roche, qui font tourner en sens contraire le plan de polarisation, fut longtemps un mystère. M. Herschell souleva le premier le voile qui couvrait cette anomalie en mettant en évidence la liaison

qui existe entre le sens de la rotation et le mode de cristallisation. Le cristal de roche dans sa forme ordinaire présente un prisme à six pans, terminé par une pyramide à six faces. Les angles solides formés par la jonction du prisme et de la pyramide sont souvent remplacés par des faces secondaires, obliques par rapport aux faces primitives ou principales. Cette variété de quartz a reçu le nom de *plagiëdral*. Les faces accidentelles sont toutes inclinées dans le même sens, et l'on s'est assuré que si le sommet de la pyramide étant en haut, les faces plagiëdrales sont dirigées vers la droite, le cristal est dextrogyre : il sera lévogyre si les faces sont inclinées vers la gauche.

M. Brewster a découvert, depuis, que l'améthyste ou quartz violet est formé de couches alternatives de quartz dextrogyre et lévogyre. On peut mettre en évidence cette structure remarquable en brisant le cristal ; car les bords des couches se dépassent mutuellement à la surface d'un morceau fraîchement rompu, et y produisent ces ondulations singulières qui forment le caractère principal servant à distinguer ce minéral du quartz ordinaire. Mais cette même structure se manifeste avec une grande magnificence quand une plaque d'améthyste, coupée perpendiculairement à l'axe et éclairée par la lumière polarisée transmise le long de cet axe, est soumise à l'analyse ordinaire : les couches successives produisent par leur composition inégale un magnifique contraste de bandelettes colorées et d'espaces obscurs.

207. M. Biot d'abord, et M. Seebeck, ont découvert presque simultanément que plusieurs liquides, et même des vapeurs, possédaient la même propriété que le quartz, et imprimaient au plan de polarisation du rayon transmis une rotation proportionnelle à l'épaisseur de la masse traversée. On met ce fait facilement en évidence en faisant passer un rayon polarisé à travers un long tube rempli du liquide en question, fermé à ses deux extrémités par des plaques de verre parallèles, et analysant le rayon émergent à l'aide d'un prisme doublement réfringent. L'huile de térébenthine, l'huile de citron, une solution de sucre dans l'eau, une solution de camphre dans l'alcool, et beaucoup d'autres fluides sont doués de la propriété rotative. L'huile de térébenthine est dextrogyre ; les autres liquides que nous avons nommés sont lévogyres. Ces fluides ne

perdent pas leur pouvoir rotatif par leur dilution dans d'autres liquides qui ne jouissent pas du même pouvoir. L'on a découvert qu'ils le conservaient encore quand ils passaient à l'état de vapeur. Ils possèdent cette propriété à un degré plus faible que le quartz, de sorte que le rayon, pour subir la même déviation dans son plan de polarisation, doit traverser une plus grande épaisseur du fluide.

Ainsi, une plaque de cristal dont l'épaisseur est d'un millimètre fait décrire au plan de polarisation du rayon rouge un arc de 18°; une couche d'huile de térébenthine de moindre épaisseur imprimerait une rotation d'un quart de degré.

M. Biot a trouvé encore que si l'on mêle plusieurs liquides doués du pouvoir rotatif, la rotation produite par leur mélange est toujours la somme ou la différence des rotations qu'ils produiraient isolément, suivant qu'ils sont de même nom ou de noms contraires: cette loi s'étend même quelquefois au cas où les liquides se combinent chimiquement. De ces faits, et d'un grand nombre d'autres, M. Biot concluait que le pouvoir rotatif était inhérent aux dernières particules des corps. Cette manière de voir est fortement combattue par des faits non moins certains. Le quartz perd son pouvoir rotatif quand il perd sa structure cristalline. M. Herschell a observé que le quartz tenu en dissolution dans la potasse ne dévie plus le plan de polarisation; M. Brewster a étendu cette observation au quartz fondu.

208. On a démontré que le phénomène de la polarisation rotatoire produit par le quartz avait pour cause l'interférence de deux faisceaux ou rayons polarisés circulairement, transmis le long de l'axe avec des vitesses inégales, et dont l'un tourne de droite à gauche, tandis que l'autre tourne de gauche à droite. Un rayon polarisé rectilignement, ou polarisé dans un plan est équivalent de fait, comme nous l'avons vu, à deux rayons circulairement polarisés, d'intensité moitié moindre, et produit par des vibrations de directions opposées. Lors donc que le rayon polarisé rectilignement tombe normalement sur la surface d'une plaque de cristal de roche taillée perpendiculairement à l'axe, on peut le concevoir décomposé en deux rayons polarisés circulairement. Si l'on suppose de plus que ces deux derniers rayons sont transmis avec des vitesses différentes, de telle sorte que quand ils reprendront la

même vitesse à leur émergence, l'un d'eux soit en avance sur l'autre, ils formeront encore à leur sortie un rayon unique, polarisé dans un seul plan ; mais le second plan de polarisation sera séparé du premier par un angle proportionnel à l'intervalle d'interférence, et par conséquent à l'épaisseur du cristal.

209. Les lois de la polarisation rotatoire sont ainsi complétement expliquées, et il reste seulement à prouver la vérité de l'hypothèse admise, que deux rayons polarisés circulairement et de vibrations opposées sont transmis le long de l'axe du cristal avec des vitesses inégales. Il est facile de faire prononcer l'expérience sur la nature de ce fait, car une semblable différence de vitesse doit produire une différence de réfraction, si la surface d'émergence est oblique à la direction du rayon. Si donc, dans l'hypothèse admise, un rayon polarisé traverse un prisme de cristal de roche dans la direction de l'axe optique, il devra subir à sa sortie une double réfraction ; et de plus les deux rayons dans lesquels il sera décomposé devront être polarisés circulairement. Cette déduction de la théorie a été complétement vérifiée par Fresnel à l'aide d'une combinaison achromatique de prismes dextrogyres et lévogyres, disposés de manière à doubler la séparation des rayons. L'illustre physicien s'est assuré que les deux rayons réfractés n'étaient ni de la lumière commune ni de la lumière polarisée rectilignement, et qu'ils présentaient tous les caractères de la lumière circulairement polarisée.

210. M. Airy a repris dernièrement cette question délicate de la réfraction particulière au cristal de roche, et il a réussi à démontrer que si un rayon polarisé rectilignement est transmis à travers cette substance, dans une direction inclinée à l'axe, il est divisé en deux autres rayons polarisés elliptiquement, et que les grands axes des ellipses décrites en sens contraire coïncident respectivement avec le plan principal et un plan perpendiculaire au plan principal. Le rapport des axes des ellipses varie avec l'inclinaison du rayon sur l'axe optique ; ils sont égaux lorsque la direction des rayons coïncide avec l'axe et croissent en même temps que l'inclinaison. Quant à la marche des rayons réfractés, M. Airy a trouvé qu'elle est constamment déterminée par la loi d'Huygens ; mais que la sphère et le sphéroïde qui déterminent la direction et la vitesse des deux rayons ne se touchent pas, comme dans tous les autres cristaux uni-axes

connus ; la seconde surface est entièrement renfermée dans la première. C'était la conséquence nécessaire de ce fait, que l'intervalle d'interférence des deux rayons ne s'évanouit pas lorsque l'inclinaison du rayon sur l'axe optique devient nulle.

M. Airy a calculé dans cette hypothèse la forme que doivent présenter les anneaux produits par le quartz dans la lumière polarisée rectilignement ou circulairement. L'accord entre la théorie et les faits d'expérience a toujours été frappant. Parmi les phénomènes les plus remarquables dont il a ainsi développé les lois, nous citerons celui qui résulte de la superposition de deux plaques de quartz de même épaisseur, mais de dénominations différentes, dont l'une est dextrogyre et l'autre lévogyre.

211. Tous ces faits si compliqués ont été enchaînés par M. Maccullagh, qui a ainsi déduit leurs lois d'un même aperçu théorique. Dans ce travail, qui fait partie du dix-septième volume des *Transactions de l'Académie royale irlandaise*, l'auteur débute en donnant comme par divination aux équations différentielles du mouvement vibratoire dans le cristal de roche, la forme qu'il croit leur appartenir : et il en déduit la polarisation elliptique des deux rayons, la loi qui lie les axes des ellipses à l'inclinaison du rayon sur l'axe, l'intervalle d'interférence dans la direction de l'axe, la forme particulière de la surface de l'onde, etc., etc. Il est un fait qui semble donner à cette théorie quelque valeur, c'est qu'elle ne contient qu'une constante, et qu'après que cette constante eut été déterminée par le moyen des mesures prises par M. Biot dans une certaine classe de phénomènes, l'auteur put calculer ensuite les expériences de M. Airy, relatives à un ordre de phénomènes tout-à-fait différent en apparence. Il y eut un accord remarquable entre les résultats du calcul et les données de l'observation. Je n'admets pas avec M. Lloyd que les expériences de M. Airy soient d'un ordre totalement différent de celles de M. Biot ; il s'agissait, si je ne me trompe, de passer du cas où la direction du rayon coïncidait avec l'axe, au cas où cette même direction était oblique à l'axe. Ce n'était nullement comme quand M. Cauchy déduisait de la simple observation de deux angles, l'incidence principale et l'azimuth principal de réflexion, les formules qui donnent la quantité de lumière réfléchie à la surface des métaux. Dans tous les cas,

M. Mac-Cullagh n'a fait qu'un premier pas ; il fallait déduire rigoureusement d'une théorie générale, de principes mécaniques certains, l'équation différentielle qu'il avait adoptée par un heureux instinct. Cette gloire n'a pas été donnée au jeune géomètre irlandais ; M. Cauchy a-t-il été plus heureux? nous le croyons. Voici sa théorie, dont nos lecteurs jugeront.

212. M. Biot, qui, comme nous l'avons vu, s'est particulièrement occupé de la rotation imprimée par certains liquides, ou même par certaines vapeurs, aux plans de polarisation des rayons lumineux, demanda à M. Cauchy, il y a deux ou trois ans, s'il parviendrait à tirer du calcul intégral l'explication et les lois de ce phénomène, qu'il regardait avec raison comme l'un de ceux auxquels il importait surtout d'appliquer la physique mathématique. L'illustre géomètre lui répondit qu'il s'occuperait de cette question, dont il espérait bien lui donner une solution satisfaisante. Il croyait alors que la marche à l'aide de laquelle il était parvenu à déduire de l'analyse non seulement l'explication de la plupart des phénomènes lumineux, mais aussi les lois de ces phénomènes, suffiraient pour le conduire à la solution de la question proposée. Mais après l'avoir attaqué à plusieurs reprises il se trouva toujours arrêté par des difficultés inattendues. Pour les surmonter, il s'est vu obligé de suivre une marche nouvelle, qui heureusement n'a pas tardé à les faire disparaître, et qui peut conduire assez simplement à la solution d'un grand nombre de problèmes de physique mathématique.

213. Dans les problèmes de mécanique appliqués, et de physique mathématique, on suppose ordinairement que l'on connait les diverses forces et les masses qu'elles sollicitent, puis on déduit de cette connaissance les équations différentielles des mouvements de ces masses ; et c'est en intégrant les équations différentielles dont il s'agit qu'on parvient à l'explication des phénomènes représentés quelquefois par les intégrales générales, mais le plus souvent par des intégrales particulières de ces mêmes équations. C'est ainsi qu'après avoir établi les équations différentielles du mouvement des liquides et des fluides élastiques, les géomètres en on déduit les lois de la propagation du son dans l'air, ou de la propagation des ondes liquides à la surface d'une eau tranquille. C'est ainsi encore

qu'en 1829 et 1830, M. Cauchy parvint à déduire des équations du mouvement vibratoire d'un système isotrope de molécules, les vibrations transversales des ondes lumineuses. Des phénomènes aussi simples ou aussi évidemment liés à des causes connues que ceux qui viennent d'être rappelés, devaient se présenter les premiers dans l'application de l'analyse à la physique; mais à mesure que les phénomènes se compliquent, ou que leur cause immédiate est plus cachée, il devient plus difficile de les soumettre à une analyse qui puisse servir à en découvrir les lois. Concevons, pour fixer les idées, qu'il s'agisse de touver les lois des mouvements vibratoires qu'exécutent les molécules du fluide lumineux, dans un liquide qui imprime à un rayon polarisé une rotation proportionnelle au chemin parcouru par ce rayon. On sera, il est vrai, naturellement porté à croire que ce mouvement, comme tous les mouvements périodiques, doit être représenté par un système d'équations linéaires aux dérivées partielles ou même d'équations linéaires à coefficients constants. Mais quelle doit être la forme particulière de ces équations pour qu'elles puissent représenter le mouvement dont il s'agit? Les équations différentielles des mouvements infiniment petits d'un système de molécules, renferment déjà un très grand nombre de coefficients. Le nombre de ces coefficients se trouvera encore considérablement augmenté si l'on tient compte, avec quelques auteurs, des rotations des molécules, ou, avec M. Cauchy, des divers atomes qui peuvent composer une seule molécule; enfin il croîtra de nouveau si l'on considère deux ou plusieurs systèmes de molécules au lieu d'un seul. A la vérité, on pourra, dans ce dernier cas, en supposant toutes les équations linéaires, réduire les inconnues à trois ou même à une seule par des éliminations; mais tous les coefficients que renfermaient les équations primitives entreront dans l'équation ou dans les équations résultantes, et ce serait un grand hasard si en essayant d'attribuer à ces coefficients divers systèmes de valeurs particulières, on finissait par trouver précisément celles qui rendent possible la rotation continue du plan de polarisation d'un rayon lumineux. C'est pour vaincre cette difficulté que M. Cauchy a imaginé la nouvelle méthode que nous allons exposer.

Au lieu de former *à priori* les équations différentielles d'après la

nature des forces et des systèmes de molécules supposées connues, et d'intégrer ensuite ces équations différentielles, pour en déduire les phénomènes observés, M. Cauchy s'est proposé de remonter de ces phénomènes aux équations des mouvements infiniment petits. Parmi les principes généraux qui peuvent servir à la solution de ce problème, il en est deux surtout qu'il importe de signaler.

Un premier principe, c'est qu'avant de rechercher les équations différentielles des mouvements infiniment petits que ce système peut propager, on doit s'attacher d'abord à connaître ceux que M. Cauchy a nommés mouvements simples ou par ondes planes. Lorsque ces derniers sont tous connus, il devient facile d'obtenir le système des équations cherchées, et particulièrement l'équation caractéristique correspondante à ce système.

Un second principe est l'inverse d'un autre principe déjà connu. On sait que si plusieurs mouvements infiniment petits peuvent se propager dans un milieu donné, on pourra en dire autant du mouvement résultant de leur superposition. Il y a plus: tout mouvement infiniment petit, propagé dans un milieu, peut être considéré comme résultant d'un nombre fini ou infini de mouvements simples, dont chacun peut encore être propagé dans le même milieu. M. Cauchy démontre la proposition réciproque, et fait voir que, si un mouvement infiniment petit, propagé dans un milieu donné, peut être considéré comme résultant de la superposition de plusieurs mouvements simples, chacun de ceux-ci pourra encore se propager dans ce milieu; toutefois cette proposition réciproque suppose non seulement que le mouvement résultant peut être représenté par un système d'équations linéaires aux dérivées partielles, mais encore que les mouvements simples, surperposés les uns aux autres, sont en nombre fini, et correspondent à des symboles caractéristiques différents. Appliquons ces principes à la théorie qui nous occupe.

214. En faisant tomber sous l'incidence normale un rayon polarisé, sur une plaque de cristal de roche taillée perpendiculairement à l'axe optique, M. Arago a reconnu, dès 1811, que les deux images produites par un prisme biréfringent offrent des couleurs complémentaires lorsque le prisme vient à tourner. Cette belle expérience s'explique très bien, comme l'a remarqué M. Arago, quand on suppose que les divers rayons colorés se trouvent polarisés à leur

émergence dans des plans différents; et Fresnel a démontré que pour obtenir un tel résultat, il suffit d'admettre dans la plaque de cristal de roche deux rayons simples polarisés circulairement en sens contraires, mais doués de vitesses de propagation diverses. En effet, si l'on superpose l'un à l'autre deux rayons simples constitués comme on vient de le dire, le rayon résultant de leur superposition offrira les mêmes vibrations moléculaires qu'un seul rayon polarisé rectilignement, mais dont le plan de polarisation tournerait en décrivant un angle proportionnel, comme l'expérience l'indique, au chemin parcouru, c'est-à-dire à l'épaisseur de la plaque. Il y a plus : en vertu de l'un des principes ci-dessus énoncés, les deux rayons simples polarisés circulairement seront bien réellement deux rayons distincts, dont chacun pourra être séparément propagé par la plaque de cristal de roche taillée perpendiculairement à l'axe ; et ces deux rayons devront se séparer l'un de l'autre, s'ils sortent de la plaque par une face inclinée sur cet axe. Ces conclusions se trouvent confirmées par des expériences de Fresnel.

M. Biot a reconnu que le cristal de roche n'est pas la seule substance qui dévie les plans de polarisation des rayons lumineux ; plusieurs liquides et vapeurs, par exemple, l'huile de térébenthine, l'huile de limon, le sirop de sucre concentré, jouissent de la même propriété. Ce phénomène est ici d'autant plus singulier que chacun des corps dont il s'agit est, comme tous les fluides, un corps isophane, et qu'en conséquence la propriété ci-dessus énoncée se vérifie, quel que soit le sens dans lequel le liquide se trouve traversé par un rayon polarisé. Il importait de rechercher quelle est la forme particulière que doivent présenter dans ce cas les équations différentielles des mouvements infiniment petits des molécules lumineuses. Pour appliquer à la solution de ce problème les principes par lui établis, M. Cauchy a dû commencer, d'après ce qui a été dit ci-dessus, par chercher les conditions analytiques de la polarisation circulaire. Il a été assez heureux pour les obtenir sous une forme très simple. Ces conditions se réduisent à deux ; et pour que la polarisation d'un rayon lumineux devienne circulaire, il suffit que la dilatation symbolique du volume, ou l'expression imaginaire dont la partie réelle donne la dilatation réelle du volume, s'évanouisse avec la somme des carrés des trois déplacements sym-

boliques de chaque molécule. En partant de ces conditions, il a pu facilement parvenir aux équations cherchées. Ce qu'il y a de remarquable, c'est que ces équations, dont chacune est à l'ordinaire du second ordre, par rapport au temps, renferment, par rapport aux coordonnées, non seulement des termes d'ordres pairs, mais aussi des termes d'ordres impairs; par exemple, du premier ordre, du troisième, etc.; c'est même des termes d'ordre impair que dépend l'existence du phénomène. Lorsqu'ils subsistent, alors, dans le milieu isophane que représente les systèmes des équations différentielles, deux rayons polarisés circulairement en sens contraires peuvent se propager avec des vitesses différentes. Mais ces deux vitesses deviendront égales si les termes d'ordre impair venant à disparaître, les termes d'ordre pair subsistent seuls, et alors le milieu isophane cessera de faire tourner le plan de polarisation d'un rayon lumineux. Dans le premier cas, les deux rayons simples qui se superposent pour former un rayon dont le plan de polarisation tourne sans cesse, et proportionnellement au chemin parcouru, se sépareront s'ils sortent du liquide par une face inclinée à l'axe du rayon. Désirant savoir pourquoi cette séparation n'avait pu être encore constatée par l'expérience, M. Cauchy a été curieux de calculer l'angle que devaient former à leur sortie les deux rayons émergents, et il a trouvé que cet angle se réduisait pour l'huile de térébenthine et pour le rayon rouge à environ $\frac{1}{9}$ seconde sexagésimale, lorsque l'angle de réfraction était de 45°. Si l'angle de réfraction vient à varier, la séparation variera proportionnellement à la tangente de ce même angle. Ce calcul montre que, pour rendre la séparation sensible, on sera obligé de superposer un grand nombre de fois l'un à l'autre, dans un même tube, deux liquides qui, étant séparés par des plaques de verre inclinées à l'axe du tube, dévient le plan de polarisation d'un même rayon en sens contraire.

215. Les équations différentielles que M. Cauchy a obtenues fournissent immédiatement la loi générale suivant laquelle l'indice de rotation d'un rayon homogène et polarisé varie avec la couleur. La nature particulière de cette loi dépend surtout des valeurs que prennent les coefficients des divers termes d'ordre impair. Concevons, pour fixer les idées, qu'avec les termes d'ordre pair, ou plutôt avec les termes du second ordre, qui d'après l'expérience

ont la plus grande part d'influence sur les phénomènes observés, on conserve encore les termes du troisième ordre. Alors on obtiendra précisément la loi remarquable énoncée par M. Biot relativement au cristal de roche et à un grand nombre de liquides, et l'on trouvera des indices de rotation qui seront à très peu près réciproquement proportionnels aux carrés des longueurs des ondes. Mais la loi sera modifiée si, aux termes du deuxième et du troisième ordre, on joint des termes du premier ordre. Dans le cas général, l'indice de rotation pourra être sensiblement représenté par une fonction entière du carré du rapport qui existe entre l'unité et la longueur d'une ondulation, et par conséquent son expression sera semblable à celle que M. Cauchy a obtenue et vérifiée dans la théorie de la dispersion des couleurs, pour le carré de la vitesse de propagation d'un rayon lumineux. D'ailleurs les coefficients des deux ou trois termes sensibles que renfermera la fonction entière dont il s'agit, dépendront ici, comme dans la théorie de la dispersion, de la nature des forces moléculaires et de la constitution particulière du milieu isophane. M. Biot a donc eu raison de dire qu'il y a ici une condition spéciale dépendante des milieux que la lumière traverse, et analogue à la dispersion dans la réfraction ordinaire.

216. Au reste, le nouveau système d'équations différentielles que M. Cauchy a obtenues n'est pas seulement applicable à la théorie de la polarisation circulaire. En effet, ce nouveau système devra représenter généralement les lois de la propagation des mouvements infiniment petits dans un système isotrope de molécules, lors même que ces mouvements viendraient à s'éteindre en se propageant. Donc, si l'on traite en particulier de la théorie de la lumière, il devra représenter les ondes planes produites par les vibrations de l'éther dans les corps isophanes, transparents ou non transparents. Or, en effet, pour que les mouvements simples, représentés par le nouveau système, soient au nombre de ceux qui s'éteignent en se propageant, il suffit que le coefficient des termes du deuxième ordre devienne négatif, et alors la constante, qui, dans le cas contraire, représentait la vitesse de propagation des ondes, peut devenir en partie réelle, en partie imaginaire. C'était déjà en supposant cette constante composée de deux parties, l'une réelle, l'autre imaginaire, que M. Cauchy est parvenu, en 1836, à expliquer la po-

larisation elliptique produite par la réflexion de la lumière à la surface des métaux, et à établir des formules qui, en représentant ce phénomène, s'accordaient avec la plupart des expériences faites par M. Brewster. Mais il n'avait pas bien vu, jusqu'à ce jour, comment la supposition de laquelle il était parti pouvait se concilier avec la forme particulière des équations différentielles des mouvements infiniment petits dans les corps diaphanes. Cette difficulté se trouvant aujourd'hui levée, il ne doute pas que ses nouvelles formules, jointes aux lois générales qu'il a données dans ses précédents mémoires, et qui sont relatives à la réflexion des mouvements simples, ne reproduisent exactement le phénomène de la polarisation métallique.

217. Résumons d'une manière plus nette encore cette théorie si délicate.

Un caractère commun à tous les milieux isophanes, c'est que les seuls mouvements simples, ou à ondes planes, qui puissent s'y propager sans s'éteindre, se réduisent toujours à des mouvements dans lesquels les vibrations moléculaires sont transversales ou longitudinales, c'est-à-dire comprises dans les plans des ondes, ou perpendiculaires à ces mêmes plans. Mais, d'après ce que nous avons dit, la longueur des ondulations étant donnée, les mouvements simples, à vibrations transversales, peuvent ou se propager tous avec la même vitesse, ou se propager les unes avec une certaine vitesse, les autres avec une vitesse différente; et dans ce dernier cas, ils présentent deux rayons polarisés circulairement en sens contraire. Par suite, on doit distinguer deux espèces de milieux isophanes, savoir, des milieux dans lesquels se propage un seul rayon de chaque couleur, polarisé rectilignement, ou circulairement, ou elliptiquement, et des milieux dans lesquels peuvent se propager deux rayons de chaque couleur, polarisés circulairement en sens contraires, mais doués de vitesses de propagation inégales.

Concevons maintenant qu'un rayon non homogène, de lumière blanche, doué de la polarisation rectiligne, tombe sur la surface supposée plane d'un milieu isophane de la seconde espèce. Il pourra être considéré comme résultant de la superposition d'une infinité de rayons de diverses couleurs, dont chacun sera partagé par le milieu isophane en deux autres rayons de même couleur, polarisés

circulairement en sens contraires, mais doués de vitesses de propagations différentes. En d'autres termes, le rayon incident de lumière blanche pourra être considéré comme décomposé par le milieu isophane en une infinité de rayons de diverses couleurs, dont chacun serait polarisé rectilignement, mais dont les plans de polarisation tourneraient plus ou moins rapidement en décrivant des angles variables, non seulement avec l'épaisseur du milieu, mais aussi avec la nature de la couleur; on verra donc ici se produire ce qu'on peut appeler la dispersion circulaire des couleurs. Pour rendre cette dispersion sensible, il suffira d'analyser la lumière transmise à travers le milieu isophane, à l'aide d'un prisme biréfringent. Les deux images produites par le prisme paraîtront colorées, et elles offriront des couleurs complémentaires qui varieront quand le prisme tournera sur lui-même. C'est en cela que consistent, comme l'on sait, les phénomènes de la polarisation chromatique.

218. Quant aux lois de la dispersion circulaire, M. Cauchy a pu facilement les déduire des principes établis dans les paragraphes précédents, en se servant des expériences de M. Biot pour déterminer les coefficients que renferment les formules. Ici encore, comme dans le cas de la dispersion plane, il a reconnu qu'il suffisait ordinairement de conserver dans chaque formule le coefficient du premier ou des deux premiers termes pour que les observations se trouvassent représentées avec une exactitude satisfaisante, et voici les lois très simples auxquelles il est parvenu.

Pour la plupart des milieux isophanes qui représentent les phénomènes de la polarisation chromatique, la différence entre les longueurs d'ondulation correspondantes aux deux rayons polarisés circulairement en sens contraires est indépendante de la nature de la couleur. Pour l'acide tartrique étendu d'eau, cette différence se compose de deux termes, l'un constant, l'autre réciproquement proportionnel aux carrés des longueurs d'ondulation.

Par suite, si, pour l'acide tartrique étendu d'eau, l'on multiplie les indices de rotation relatifs aux diverses couleurs par les carrés des longueurs d'ondulation correspondantes à ces mêmes couleurs, les différences entre les produits ainsi obtenus seront à très peu près entre elles comme les carrés de nombres réciproquement proportionnels aux longueurs d'ondulation.

Voyons maintenant jusqu'à quel point cette condition se trouve remplie.

Après avoir renfermé dans un tube, dont la longueur est de 1^m,003, une dissolution d'acide tartrique avec environ 2/3 d'eau et à une température de 26 dégrés centésimaux, M. Biot a examiné et analysé la lumière transmise à travers cette dissolution, à l'aide d'un prisme biréfringent; puis il a conclu de ses expériences que les indices de rotation relatifs aux rayons violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge, étaient sensiblement représentés par les angles

$$39^\circ\, 38'\, 3'',\ 42^\circ\, 8'\, 55'',\ 44^\circ\, 39'\, 47'',\ 46^\circ\, 10'\, 37'',\ 42^\circ\, 51'\, 29'',\ 40^\circ\, 29'\, 14'',\ 38^\circ\, 7'\, 11''.$$

Or, ces angles sont sensiblement proportionnels aux nombres

(f) 3963, 4213, 4465, 4617, 4285, 4048, 3812.

D'autre part, les longueurs d'ondulation exprimées en millionièmes de millimètre, et correspondantes aux rayons dont il s'agit, sont, d'après les expériences de Fresnel, sensiblement représentées par les nombres

423, 449, 475, 511, 551, 583, 620.

Et si l'on multiplie les carrés de ces derniers nombres par les premiers, les produits seront sensiblement proportionnels aux termes de la suite

(g) 71, 85, 101, 120, 130, 138, 147.

Il est important d'observer que dans cette dernière suite les divers termes croissent avec la longueur d'ondulation : ce qui n'avait pas lieu pour la suite (f). Ce n'est pas tout, les différences entre les divers termes de la suite (g) sont respectivement

(h) 14, 16, 19, 10, 8, 9.

Et d'autre part, si l'on divise l'unité par les carrés des longueurs d'ondulation relatifs aux divers rayons, on obtiendra les nombres

(i) 559, 496, 443, 329, 294, 260,

dont les différences

(j) 63, 53, 60, 54, 35, 34,

seront sensiblement proportionnelles aux nombres

(l) 16, 14, 15, 14, 9, 9.

Or, les différences qui existent entre les termes des suites (h) et (l) sont de l'ordre des erreurs que comporte la détermination des nombres (g), puisqu'on ne peut répondre de chacun de ces nombres, et par conséquent des nombres (h) qu'à deux ou trois unités près. Donc, ici encore, les différences qui existent entre les résultats du calcul et les résultats de l'expérience sont de l'ordre de celles que peuvent produire les erreurs d'observation.

219. M. Cauchy, cette fois encore, a donc eu la gloire de déduire de sa formule une loi qui avait échappé même aux innombrables investigations de M. Biot. C'était une belle manière de relever le gant jeté un peu fièrement peut-être par le grand physicien à l'infatigable géomètre.

Il est évident, toutefois, que cette méthode de M. Cauchy laisse quelque chose à désirer : elle ne se rattache en aucune manière à sa théorie générale, qu'elle semble même nier ; elle procède, non plus *à priori* et en partant de principes généraux, mais *à posteriori*; elle ne devance plus l'expérience, elle la suit. Nous allions développer avec franchise ces observations critiques, quand une discussion, soulevée tout-à-coup à l'Académie des sciences, lundi dernier 19 mai, est venue rendre notre tâche plus facile, et jeter un jour nouveau sur la grande question de la polarisation mobile. M. Laurent, jeune officier du génie employé aux travaux de fortifications du Havre, et qui depuis un an s'est révélé au monde savant par la publication de plusieurs mémoires vraiment remarquables, a adressé à M. Arago, et par M. Arago à l'Académie des sciences, la lettre suivante :

220. « La théorie de la polarisation mobile en est encore aujourd'hui au point où l'a laissée Fresnel. M. Cauchy, il est vrai, a donné des équations différentielles propres à reproduire l'explication de ces phénomènes telle que l'a présentée l'illustre physicien que je viens de citer ; mais ces équations sont purement empiriques. En effet, M. Cauchy les a formées en admettant *à priori* précisément

ce qu'il serait très important de vérifier, c'est-à-dire que dans certains systèmes de molécules les mouvements simples, polarisés circulairement en sens contraire, se propagent *nécessairement* avec des vitesses différentes. En outre, ces équations empiriques sont incompatibles avec celles qui représentent les lois des mouvements d'un système, ou même de deux systèmes isotropes de points matériels, et que, depuis quatorze ans, M. Cauchy donne comme représentant les lois des mouvements de la lumière dans les corps diaphanes. En un mot, il est mathématiquement impossible que dans un système ou même deux systèmes isotropes de points matériels, deux mouvements simples polarisés circulairement en sens contraire doivent *nécessairement* se propager avec des vitesses différentes. Ainsi donc, si on adopte l'hypothèse de points matériels admise sans réserve par M. Cauchy pour former les équations du mouvement de la lumière, il faut nécessairement admettre que l'explication des phénomènes de la polarisation mobile donnée par Fresnel est inexacte, et il en résulterait une objection sérieuse contre le système des ondulations, dont toutes les formules ne pourraient plus être considérées que comme empiriques. Voilà l'état actuel de la question. Je pense que vous au moins, monsieur, partisan déclaré du système des ondulations, non seulement pour représenter les lois des phénomènes lumineux, mais encore pour en donner l'explication réelle, vous verrez avec plaisir que l'explication que Fresnel a donnée des importants phénomènes de polarisation mobile que vous avez signalés le premier, est une conséquence nécessaire de l'hypothèse de molécules à dimensions sensibles. Dans le mémoire que j'ai l'honneur de vous adresser, je ne considère, il est vrai, qu'un système unique de sphéroïdes ; mais les conséquences auxquelles j'arrive subsistent, si l'on considère un système de sphéroïdes et un système de points matériels qui coexistent dans une portion donnée de l'espace. Il est donc *prouvé* que les molécules des corps ont des dimensions sensibles. J'attache d'autant plus d'importance à ce résultat qu'on devra nécessairement admettre les conséquences vraiment extraordinaires qui en résultent, et que je me propose de vous communiquer au fur et à mesure que le peu de loisirs dont je dispose me permettra de les rédiger. »

Dans le mémoire qui accompagne cette lettre, M. Laurent dé-

montre que pour qu'un système de sphéroïdes puisse présenter les phénomènes de la polarisation mobile, il est nécessaire qu'ils ne soient point identiques ; que, si l'identité n'existe pas, deux mouvements simples, d'une même longueur d'ondulation, polarisés circulairement en sens contraire, se propageront nécessairement avec des vitesses différentes. M. Laurent promet de développer plus tard les conséquences remarquables de cette déduction théorique.

221. Cette attaque contre la théorie de M. Cauchy était un peu vive, et quelque peu injuste ; le mot *empirique* était mal choisi, M. Laurent n'en a probablement pas compris la vraie signification et la portée. L'illustre géomètre oppose à son sévère adversaire les observations suivantes, que nous adoptons.

La méthode de M. Cauchy n'est nullement empirique ; elle est bien certainement analytique et rationnelle ; ses équations sont mathématiquement déduites, sinon d'une hypothèse particulière sur la nature des forces et sur la constitution d'un système, du moins de nouveaux principes appliqués aux phénomènes de la polarisation chromatique.

M. Laurent fait observer que les équations différentielles de ce genre de polarisation sont incompatibles avec celles qui représentent les mouvements d'un système isotrope de points matériels, telles que M. Cauchy les a données dans les exercices. Cette proposition est évidente par elle-même, puisque pour passer des unes aux autres il faut faire évanouir une certaine fonction, et qu'en réduisant cette fonction à zéro on fait précisément disparaître la polarisation circulaire : aussi M. Cauchy s'est bien gardé de confondre ces équations les unes avec les autres. Loin de réduire les molécules à de simples points matériels, M. Cauchy dit expressément (*Compt. rend.*, t. xv, p. 911) : « Le nombre des coefficients que renferment les équations des mouvements infiniment petits d'un système de molécules se trouvera encore considérablement augmenté si l'on tient compte, avec quelques auteurs, des rotations des molécules, ou avec moi-même, des divers atomes qui peuvent composer une seule molécule : il croîtra de nouveau si l'on considère deux ou plusieurs systèmes de molécules au lieu d'un seul. » Ailleurs, page 1082, M. Cauchy parle du centre de gravité de la molécule, et il est clair qu'il n'y a lieu de parler du centre de gravité d'une molécule que dans le cas

où cette molécule ne se réduit pas à un simple point matériel.

Il est prouvé pour nous, 1° que la théorie de polarisation mobile n'en est plus au point où l'avait laissée Fresnel : M. Cauchy l'a enrichie de la belle loi de la dispersion circulaire (n° 218) qui n'avait été ni indiquée par Fresnel, ni découverte par M. Biot; 2° que les équations de M. Laurent sont identiques avec celles de M. Cauchy.

Reste à savoir si M. Laurent est parvenu à établir *à priori* les équations différentielles de la polarisation chromatique, en partant de la seule considération des actions mutuelles de molécules dont les dimensions ne sont pas supposées nulles.

Pour se former à ce sujet une opinion raisonnée, il sera nécessaire non seulement de lire avec attention la note de M. Laurent, mais encore de connaître le développement des calculs dont cette note offre seulement un aperçu. Si M. Laurent a effectivement démontré qu'on peut obtenir un système de sphéroïdes qui présente les phénomènes de la polarisation circulaire, cette proposition constituera, dans la théorie de la polarisation, un nouveau progrès auquel M. Cauchy s'empressera d'applaudir.

222. Avant que M. Cauchy vînt essayer d'expliquer mathématiquement la question délicate de la rotation du plan de polarisation, et révéler au monde savant la loi du phénomène qu'il a heureusement caractérisé sous le nom de dispersion circulaire, M. Babinet, dans un mémoire fort remarquable sur la double réfraction circulaire, répondait d'une manière péremptoire à des difficultés jusque là non résolues.

Le but de M. Babinet était: 1° d'établir la formule qui donne la loi de la double réfraction circulaire; 2° d'exprimer mathématiquement sa connexion avec les phénomènes de rotation; 3° de faire connaître les procédés d'interférence qui peuvent, indépendamment de tout autre moyen, donner la mesure de cette singulière double réfraction, même dans les liquides où elle est le plus faible. Soit ρ l'indice de réfraction pour l'un des rayons circulairement polarisés qui sont transmis suivant l'axe du cristal; ce rapport, pour le second rayon circulairement polarisé, sera $\rho(1+\epsilon)$, ϵ étant une quantité très petite : ρ pour le cristal de roche est égal à 1,5484. Si l'un des deux rayons est retardé suivant l'axe du cristal d'un

intervalle équivalent dans le vide à $\frac{1}{2}\lambda$, le plan de polarisation du rayon résultant des deux faisceaux a tourné de 90°. Or l'intervalle $\frac{1}{2}\lambda$ dans le vide est équivalent dans le cristal de roche à $\frac{\frac{1}{2}\lambda}{\rho}$ ou $\frac{1}{2}\frac{\lambda}{\rho}$ C'est donc là le chemin que l'un des rayons gagne sur l'autre, quand le plan de polarisation tourne de 90°. Soit α l'angle de rotation de ce même plan pour une épaisseur d'un millimètre de cristal et pour une couleur homogène donnée, on aura une rotation de 90° pour une épaisseur égale en millimètres a $\frac{90^\circ}{\alpha}$. Les chemins équivalents parcourus par les deux faisceaux sont donc $\frac{90^\circ}{\alpha}$ pour l'un, et $\frac{90^\circ}{\alpha}+\frac{1}{2}\frac{\lambda}{\rho}$ pour l'autre ; le rapport des deux quantités ρ et $\rho\ (1+\varepsilon)$ sera celui de $\frac{90^\circ}{\alpha}$ à $\frac{90^\circ}{\alpha}+\frac{1}{2}\frac{\lambda}{\rho}$; on aura dès lors :

$$1+\varepsilon=1+\frac{1}{2}\frac{\lambda}{\rho}\frac{\alpha}{90^\circ};\quad \varepsilon=\frac{1}{2}\frac{\lambda}{\rho}\frac{\alpha}{90^\circ}.$$

Pour donner une idée de ce qu'est en général ε, supposons que l'on ait $\rho=\frac{3}{2}$, $\lambda=0^{mm},0005$, $\alpha=20^\circ$, on trouvera $\varepsilon=\frac{1}{27000}$; cette fraction est au-dessous des plus petites doubles réfractions ordinaires qui aient été observées.

Si l'on met à la suite l'un de l'autre deux prismes de cristal de roche, formant un parallélipipède que la lumière parcourt suivant l'axe du cristal, et que les deux prismes soient de rotations contraires, on sait que celui des deux qui donne la plus grande vitesse à l'un des faisceaux circulairement polarisés donne au contraire à l'autre la plus petite vitesse, et réciproquement ; en sorte que si le premier faisceau passe de la vitesse ρ à la vitesse $\rho\ (1+\varepsilon)$ le second passera de $\rho\ (1+\varepsilon)$ à ε. Or, dans ce cas, M. Babinet trouve que si l'on appelle a l'angle des deux prismes collés ensemble, la séparation angulaire δ des deux faisceaux est :

$$\delta=2\,\rho\,\varepsilon\ \text{tang}\ a.$$

Telle est la valeur de la double réfraction circulaire ; si, par exemple, $a = 80°$, on aura à peu près $\delta = \frac{1}{1500}$. Cet angle étant d'environ deux minutes, et la double réfraction étant de $\frac{1}{1500}$ de la distance de l'objet, on voit qu'à une distance de 1500 millimètres, l'image d'un objet ayant un millimètre de diamètre serait doublée.

On conclut d'un calcul semblable que pour obtenir une double réfraction circulaire, avec des prismes multiples d'essence de térébenthine et de sucre dissous, il faudrait un tel nombre de prismes ou des angles tellement grands que l'expérience est impossible.

223. Il faut donc avoir recours aux interférences pour obtenir la mesure de ces doubles réfractions circulaires si faibles ; il importait d'ailleurs de vérifier par l'expérience la formule remarquable et nouvelle :

$$\rho = 2\,\rho\,\varepsilon \operatorname{tang} a$$

M. Babinet y est parvenu par un moyen très simple. Il place une lumière homogène, d'une couleur donnée, derrière une petite ouverture verticale, et polarise la lumière transmise avec une plaque de tourmaline. A un mètre de la petite ouverture est une plaque prisme de verre qui, à un mètre derrière elle, produit de belles franges d'interférences. Au moyen de deux petites lames de mica, les deux rayons qui doivent interférer reçoivent la polarisation circulaire près de la plaque prisme, ce qui, en général, ne trouble pas les interférences, quoique les deux polarisations circulaires soient, bien entendu, de nature contraire. Cela posé, l'on place derrière les deux lames de mica un bloc de cristal de roche, que les rayons parcourront suivant l'axe. L'un des faisceaux gagnant sur l'autre, ainsi que nous l'avons vu, l'interposition de la plaque épaisse de cristal déplacera les franges d'interférence, et la quantité de ce déplacement peut être facilement évaluée, en se rappelant que pour une épaisseur de cristal égale à $\frac{90°}{\alpha}$ (environ $4\frac{1}{2}$ milli.) un des rayons gagne sur l'autre une demi-longueur d'onde. Avec l'un des cristaux dont M. Babinet a fait usage, le déplacement est

celui qui correspond à neuf franges, c'est-à-dire qu'il est de 4 à 5 millimètres avec les franges d'un demi-millimètre de largeur. En substituant à la plaque de quartz une plaque épaisse d'un liquide doué de la propriété rotatoire, on obtiendra de même la mesure de la double réfraction circulaire inobservable directement par la détermination de l'indice de réfraction ρ.

L'interposition de la plaque de cristal ou de la plaque liquide, dans l'expérience précédente, devant déplacer un peu les franges de leur position, par l'effet de la réfraction ordinaire, à cause de l'impossibilité de faire les faces d'entrée et de sortie parfaitement parallèles, on sait qu'il est indispensable de s'affranchir de cette cause d'erreur. Pour y parvenir, on laissera la plaque et les lames de mica immobiles; il suffit, en mettant à angle droit de la portion primitive la plaque de tourmaline, de faire tourner de 90° le plan de polarisation de la lumière qui, passant par l'ouverture étroite, sert d'origine commune aux rayons interférents; alors à leur arrivée sur les deux plaques de mica la polarisation circulaire des deux rayons change de nature, ainsi que la double réfraction circulaire. Le plus retardé des deux faisceaux, dans le premier cas, devient celui qui l'est le moins dans le second. Les interférences sont déplacées sans perturbation aucune dans le système des lames de mica et de la plaque circulairement biréfringente, d'une quantité dont la moitié donne l'effet de la plaque épaisse. En admettant que cet effet est représenté par le nombre n de largeurs de frange, qui marque la valeur de la moitié du déplacement total, pour une épaisseur e de la plaque, l'épaisseur qui correspondrait à une dernière frange serait évidemment $\frac{1}{2}\frac{e}{n}$, et l'on aurait $\varepsilon = \frac{\lambda n}{\rho e}$, en remplaçant $\frac{90°}{\alpha}$ par $\frac{1}{2}\frac{e}{n}$.

224. Remarquons encore, avec M. Babinet, que les rayons polarisés circulairement présentent dans leurs interférences autant de singularités que dans leurs autres propriétés optiques. Ainsi, à dire vrai, deux rayons polarisés circulairement et en sens contraire donnent toujours par leur réunion une illumination constante, quelle que soit leur différence de marche; mais si l'un d'eux a éprouvé un retard d'une demi-longueur d'onde, ces deux rayons

polarisés circulairement se combinent en un seul rayon polarisé ordinaire, mais dont le plan de polarisation est à 90° du plan de polarisation du rayon primitif d'où ils proviennent. Alors en analysant la lumière à son émergence, par une tourmaline placée parallèlement à celle qui produit la polarisation primitive, on a une extinction là où le plan de polarisation a tourné de 90°; c'est-à-dire, d'après ce qui précède, quand la différence de marche est $\frac{1}{2}\lambda$, exactement comme dans les cas ordinaires d'interférences.

Les lois fondamentales de la double réfraction circulaire, de la rotation du plan de polarisation et des interférences des rayons polarisés circulairement, ont donc été expérimentalement et théoriquement déterminées par M. Babinet, ainsi que les variations de vitesse des rayons circulairement polarisés, transmis dans les substances qui produisent la rotation. Le savant académicien ajoute que le même procédé expérimental permettra d'explorer, par des mesures de vitesses qu'aucun autre ne peut donner, comment la double réfraction circulaire du cristal de roche, suivant l'axe, passe à la double réfraction ordinaire à mesure que la route des rayons s'incline sur l'axe; objet sur lequel, même après les recherches importantes de M. Airy, la théorie et l'observation laissent encore une grande obscurité.

225. Les effets de polarisation et de coloration produits par les cristaux doublement réfringents sur la lumière transmise, sont, comme nous l'avons vu, la conséquence nécessaire de l'interférence des deux rayons, suivant lesquels la lumière se partage dans l'intérieur de ces cristaux. Ce double effet devient ainsi un caractère distinctif de la structure doublement réfringente; il nous fournit les moyens de mettre cette structure en évidence et d'en étudier les lois, même dans des substances où la séparation des deux rayons est trop petite pour qu'on puisse l'observer directement. Les mêmes phénomènes ont amené cette découverte importante, que l'on peut, par la compression mécanique ou par la dilatation, communiquer la structure doublement réfringente à des corps qui ne la possèdent pas naturellement. M. Brewster a observé que si l'on presse à la fois les deux faces opposées d'un parallélipipède de verre, il colorera la lumière polarisée de la même manière qu'un cristal double-

ment réfringent, et que la teinte produite descend de rang dans l'échelle à mesure que la pression augmente. Des cristaux simplement réfringents, le chlorhydrate de soude, le spath fluor, acquièrent par ce moyen la propriété de la double réfraction.

Ces faits sont pleinement d'accord avec la théorie des ondulations: en vertu de la liaison qui existe entre le milieu vibrant et le milieu qui le contient, l'élasticité de ce milieu ou de l'éther cesse d'être la même dans les différentes directions sous l'influence de la compression. De plus, le maximum et le mininum d'élasticité correspondent aux directions de plus grande et de moindre pression. Chaque vibration du rayon incident sera par conséquent, à son entrée dans le cristal, divisée suivant la direction de plus grande et de plus petite élasticité en deux autres vibrations qui se propageront avec des vitesses différentes. L'une d'elles sera plus retardée que l'autre, elles se trouveront à leur émergence dans des phases différentes de vibration; leurs composantes parallèles au plan de réflexion de la plaque analysante pourront par conséquent interférer, et donner naissance à des couleurs dont la teinte dépendra de l'intervalle d'interférence.

226. Les déductions de la théorie ont été confirmées expérimentalement par Fresnel, qui trouva que la vitesse avec laquelle le rayon traversait le verre était plus grande ou plus petite, suivant que son plan de polarisation était parallèle ou perpendiculaire à la ligne suivant laquelle s'exerçait la pression. La double réfraction du rayon était une suite nécessaire de cette différence de vitesse; on pouvait l'en conclure immédiatement; Fresnel fit plus, il l'observa directement. Il disposa une série de prismes de verre, de telle sorte que leurs angles réfringents fussent alternativement dans des directions opposées, et pressa fortement à l'aide de vis les extrémités des prismes alternés. Tout rayon transmis à travers cet ensemble de prismes était divisé en deux rayons de polarisations contraires, ou polarisés à angle droit. Les prismes comprimés avaient acquis dans cet arrangement la structure doublement réfringente, et la ligne de pression devenait l'axe de double réfraction. Comme les angles réfringents des prismes comprimés étaient tous tournés dans le même sens, la divergence des deux rayons croissait proportionnellement au nombre de ces prismes et devenait

par là sensible. Les prismes intermédiaires servaient, en corrigeant la déviation des rayons de diverses couleurs, à rendre la combinaison achromatique.

227. Les effets contraires de la compression et de la dilatation peuvent être mis en évidence et étudiés, à l'aide d'une plaque épaisse de verre bandée ou tendue par une force extérieure. La masse entière de la plaque est ainsi constituée dans des états différents d'élasticité. La portion convexe est dilatée, la portion concave est comprimée, tandis que, dans la partie correspondante à l'épaisseur moyenne, les molécules d'éther ont leur densité naturelle. Dès lors si l'on interpose cette plaque entre un rayon polarisé et la plaque analysante, de telle sorte qu'elle forme un angle de 45° avec le plan primitif de polarisation, on verra apparaître deux séries de bandes colorées séparées par une ligne neutre, et qui s'évanouiront ensemble si la force comprimante cesse d'agir. La partie située vers la convexité ou vers le côté dilaté de la ligne neutre acquiert la structure doublement réfringente positive; la partie située vers la concavité ou vers le côté comprimé acquiert la structure doublement réfringente négative.

Dans tous ces cas de double réfraction consécutive et transitoire, les phénomènes sont produits par la masse entière de la substance; les axes d'élasticité sont deux simples lignes, fixes de position comme de direction dans l'intérieur de la substance. Sous ce rapport les phénomènes sont essentiellement différents de ceux qui sont produits par une cristallisation régulière : les axes d'élasticité dans les cristaux sont simplement fixes de direction et non de position. La double réfraction dépend uniquement de cette direction, et est la même en tous les points du cristal.

228. Les effets de compression et de dilatation inégale peuvent être obtenus bien plus régulièrement par l'élévation et l'abaissement de la température. On peut les étudier en appliquant une bande de fer chaud au bord d'une plaque rectangulaire de verre, que l'on place dans l'appareil de polarisation; de telle sorte que le bord chauffé forme un angle de 45° avec le plan primitif de polarisation; on voit au bout de quelque temps la surface entière de la plaque se couvrir de bandes colorées. Les portions qui confinent au bord opposé ont acquis la structure doublement réfringente positive;

celles qui avoisinent le centre ont la structure doublement réfringente négative. Les effets produits seront inverses si la plaque de verre, chauffée d'abord uniformément, est refroidie rapidement sur un de ses bords; toute apparence de couleur s'évanouit dès que tous les points de la plaque sont à la même température.

Si l'on transmet la chaleur de la surface à l'axe d'un cylindre de verre en le plongeant dans l'huile chauffée, il déploiera un système d'anneaux semblables à ceux des cristaux uni-axes négatifs : l'axe du cylindre devient ainsi un axe de double réfraction. Dès que la chaleur atteint l'axe, la double réfraction s'affaiblit et s'évanouit en même temps que toute coloration dès que le verre est uniformément échauffé. Si à ce moment on refroidit rapidement le cylindre en l'entourant d'un bon conducteur du calorique, il acquerra transitoirement une structure doublement réfringente positive, et toute trace de coloration ou de double réfraction disparaîtra dès que le cylindre sera de nouveau uniformément refroidi. Si l'on emploie un cylindre elliptique au lieu d'un cylindre circulaire, on verra naître les courbes colorées propres des cristaux bi-axes; on peut varier à l'infini les apparences produites en modifiant la forme du verre.

Si maintenant, par un moyen quelconque, on arrête, on fixe le verre dans l'un des états transitoires que nous venons de décrire, il acquerra une structure doublement réfringente permanente. On y est parvenu en chauffant le verre au rouge, et le refroidissant subitement. Il se condense à sa surface et prend à l'extérieur une forme stable suivant laquelle l'intérieur doit se mouler, en retenant une densité inégale. La loi de la densité, et par suite la structure doublement réfringente, dépendront de la forme extérieure; l'on trouve, en conséquence, que les bandes des parties colorées, que de semblables verres déploient dans la lumière polarisée, présentent des arrangements réguliers qui varient avec la figure de la masse entière.

229. De même qu'à l'aide de la compression mécanique ou d'une inégalité de température on communique la structure doublement réfringente à des substances qui ne la possèdent pas naturellement, on peut, par les mêmes moyens, modifier cette structure dans les cristaux qui en jouissent déjà. C'est ainsi que MM. Brewster et Biot ont trouvé que la double réfraction peut être altérée dans les

cristaux réguliers, que la teinte produite peut monter ou descendre dans l'échelle des couleurs, par l'effet d'une simple pression.

Les changements produits par la chaleur sont encore plus remarquables. M. Mitscherlich a découvert ce fait important que la dilatation produite par la chaleur dans un cristal est différente en général dans les différentes directions, de telle sorte que leur forme étant altérée, leur pouvoir doublement réfringent est lui-même modifié. Ainsi, le spath d'Islande se dilate par la chaleur dans la direction de son axe, tandis qu'il se contracte par une petite élévation de température dans la direction perpendiculaire à l'axe. Les angles de la forme primitive varient par conséquent: le rhomboïde devient moins obtus, se rapproche du tube, c'est-à-dire d'une forme cristalline pour laquelle, comme nous l'avons dit, il n'y a point de double réfraction. M. Mitscherlich avait conclu de cette observation que dans de semblables circonstances le pouvoir doublement réfringent du cristal devait diminuer; cette conjecture a été vérifiée par l'expérience. De fait, l'indice de réfraction extraordinaire du spath d'Islande croît considérablement avec la température, tandis que l'indice de réfraction ordinaire éprouve peu ou point de variation.

230. Nous avons vu que l'inclinaison des axes optiques dans les cristaux bi-axes est une fonction simple des trois élasticités principales du milieu vibrant, et que le plan de ces axes est le plan de la plus grande et de la plus petite élasticité. Dès lors, si ces élasticités sont altérées par la chaleur dans des proportions différentes, l'inclinaison des axes variera en même temps, et il peut même arriver que le plan des axes atteigne une position perpendiculaire à la position primitive. Toutes ces modifications ont été réellement observées. M. Mitscherlich a trouvé pour le sulfate de chaux que l'angle des axes, qui est de 60° à la température ordinaire, diminue par l'application de la chaleur; qu'à mesure que la température augmente, ces axes s'approchent jusqu'à se confondre; que si la chaleur augmente encore, ils se séparent de nouveau et arrivent à former un angle droit. La chaleur dilate beaucoup plus le cristal dans une direction que dans la direction perpendiculaire. M. Brewster a observé des phénomènes semblables dans la glaubérite.

231. Arrêtons-nous: il résulte évidemment, il me semble, de cette

longue étude, qui est comme une analyse complète de toutes les recherches qui ont eu pour objet les modifications que la présence des corps de la nature imprime aux rayons lumineux, que la théorie de l'émission est complétement inadmissible. Parmi tant de phénomènes divers, il n'en est pas un seul que l'on puisse expliquer d'une manière tant soit peu satisfaisante par la simple hypothèse de molécules émises par les corps lumineux et soumises à l'action attractive ou répulsive des corps dont elles s'approchent, ou qu'elles rencontrent dans leur course. Newton se vit contraint de revêtir les molécules de caractères nouveaux; mais ces caractères paraissent, même au premier aperçu, complétement incompatibles avec d'autres propriétés certaines, et il ne put faire disparaître ces divergences qu'en recourant à une complication mécanique bien plus difficile à comprendre que les faits simples qu'il s'agissait d'expliquer. Ce n'est pas tout : chaque fait nouveau, chacune des lois des plaques minces, etc., etc., entraînait pour les accès une propriété nouvelle, et aucune de ces propriétés ne s'accordait avec les autres et ne répondait à l'ensemble mécanique dont on les faisait dépendre.

Ces imperfections de la théorie newtonienne devenaient de plus en plus effrayantes à mesure que l'on passait d'une classe de phénomènes à une autre. Pour expliquer, par exemple, les faits de la diffraction, on s'appuyait de principes entièrement étrangers à ceux par lesquels on expliquait les plaques minces; et ces deux séries de phénomènes dans ce mode d'explication étaient de nature complétement différente ou absolument indépendantes les unes des autres.

232. Il en est tout autrement pour la théorie des ondulations. Là tout est simple, tout est parfaitement en harmonie, l'ensemble comme les détails. Le principe des interférences est une conséquence nécessaire, naturelle, du mouvement vibratoire, et ce seul principe rend compte, comme nous l'avons vu, de tous les faits, conduit aux lois de tous les phénomènes. Mais ce n'est pas seulement par rapport à leur origine que les faits observés sont intimement liés les uns aux autres; ils sont de plus étroitement unis par la chaîne des nombres. Les lois si nettes des interférences, les lois si délicates de la diffraction, les lois si multiples des couleurs des plaques minces, épaisses, mixtes, etc., dépendent d'une seule constante, la longueur de l'onde dans chaque milieu, et dès que

cette constante a été déduite d'une expérience quelconque prise dans une série quelconque de phénomènes, on peut calculer *à priori* les détails de tous les autres faits ; les distances calculées s'accorderont toujours parfaitement avec les distances mesurées. La polarisation rectiligne, circulaire, elliptique, la rotation des plans de polarisation, etc., tout, dans cette même théorie des ondulations, se comprend avec la plus admirable netteté, tout se touche en quelque sorte du doigt.

233. Il me semble impossible de résister à la vérité d'une théorie qui s'appuie sur une si éclatante évidence. L'explication qu'elle fournit n'est pas seulement complète, elle est simple. Ses lois dernières ou fondamentales comme ses dernières données sont réduites au plus petit nombre possible, et si nous contemplons la variété infinie des phénomènes qui se groupent ainsi autour d'un centre commun, nous sentons qu'il nous a été donné de faire un pas réel et certain dans la connaissance des œuvres du GRAND et UNIQUE INFINI.

TROISIÈME SECTION.

RÉSUMÉ D'OPTIQUE MÉTÉOROLOGIQUE.

L'exposé de la théorie mathématique de la lumière, et la comparaison approfondie des deux systèmes de l'émission et des ondulations, composent ce que nous pouvons appeler la partie théorique de notre répertoire. Nous trouverons l'occasion de faire une application heureuse des principes établis, et en même temps de faire connaître des travaux importants en analysant avec quelques détails les faits relatifs à deux branches aujourd'hui très cultivées de la science de la lumière, l'optique météorologique et l'optique minéralogique. Les grandes découvertes dans ces divisions toutes nouvelles de l'optique, la polarisation de l'atmosphère, l'existence d'un premier point neutre, la polarisation chromatique, le dichroïsme, la propriété dépolarisante des cristaux doués de la double réfraction, etc., etc., appartiennent à M. Arago : MM. Brewster et Babinet les ont enrichies d'une foule de faits curieux, que l'on sera bien aise de retrouver groupés avec quelque ensemble.

Transparence de l'atmosphère. — L'air est un des corps les plus transparents de la nature ; sa transparence n'est cependant pas complète ; les particules atmosphériques absorbent une portion de la lumière qu'elles reçoivent, en laissent passer une partie, et réfléchissent la troisième ; de là vient qu'elles éclairent la voûte des cieux, qu'elles inondent de lumière diffuse les objets terrestres que le soleil n'éclaire pas directement, et déterminent une transition insensible entre le jour et la nuit. Il est évident que la lumière solaire s'affaiblit par son passage à travers l'atmosphère. On peut s'en convaincre par des mesures directes et exprimer la transparence de l'atmosphère par des nombres, ainsi que de Saussure l'a fait au moyen de son *diaphanomètre*. La distance à laquelle les objets disparaissent ne dépend pas uniquement de l'angle visuel, elle dépend évidemment de leur mode d'éclairement, et du contraste de leur couleur

avec celle des objets environnants. Tandis que les chaînes de montagnes, vues de la plaine et à de très grandes distances, sont visibles dans leurs moindres contours, le spectateur placé sur un de leurs sommets ne distingue presque rien dans la plaine. Cela s'explique aisément : en effet, tandis que les montagnes, par leur opacité et leur couleur foncée, tranchent avec la transparence du ciel et sont très nettement dessinées, tous les objets de la plaine, revêtus d'une teinte sombre et verdâtre, ne peuvent pas ressortir au milieu de ceux qui les environnent.

Plus l'épaisseur d'atmosphère que les rayons des corps lumineux ont à parcourir devient considérable, plus l'éclat de ces rayons s'affaiblit. La lumière du soleil ou de la lune, à leur passage au méridien, est éblouissante, tandis qu'on peut fixer ces astres lorsqu'ils sont à l'horizon. S'il était possible de mesurer l'intensité de la lumière à différentes élévations, on pourrait exprimer en nombre le pouvoir absorbant de l'air; mais les résultats donnés par l'*Héliothermomètre* de Saussure, ou par l'*Actinomètre* de MM. Herschell et Pouillet, sont encore trop imparfaits pour qu'on puisse atteindre ce but. Il paraît démontré seulement que l'absorption des rayons solaires est telle, que dans les plaines de l'Allemagne, si le soleil était au zénith et le ciel parfaitement pur, la terre ne recevrait que les 2/3 des rayons qui arrivent à la partie supérieure de l'atmosphère; tout le reste est en partie absorbé, en partie réfléchi par l'air et les particules de vapeur.

Couleur bleue du ciel. — De Saussure a fait voir que la couleur bleue du ciel tenait à la réflexion de la lumière, et non à une couleur propre des particules aériennes. Hassenfratz a démontré par l'expérience que le rayon bleu est plus réfléchi par l'air que les autres rayons : aussi, plus la couche d'atmosphère traversée par le rayon est épaisse, plus la couleur bleue disparaît, et plus la teinte rouge prédomine. Quand le soleil est à l'horizon, il nous paraît rouge pourpre et jaune. Pour mesurer l'intensité de la couleur bleue, de Saussure a inventé le *Cyanomètre* : le *Polarimètre* de M. Arago conduit au même résultat. La couleur du ciel n'est pas la même à tous les points d'un même vertical; elle est plus foncée au zénith, plus claire et quelquefois complétement blanche à l'horizon; elle devient de plus en plus foncée depuis le matin jusqu'à midi, de

plus en plus claire depuis midi jusqu'au soir. Le ciel est plus bleu entre les tropiques que dans les hautes latitudes, plus pâle en mer que dans l'intérieur des continents; à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, le ciel parait de plus en plus foncé. A une certaine hauteur, il devient presque noir. Le bleu réfléchi par les particules aériennes, le blanc des vésicules aqueuses, des flocons de neige, des petits cristaux de glace, le fond noir de l'atmosphère, modifient diversement, mais dans des proportions qui ne sont pas déterminées, la couleur bleue du ciel.

Crépuscule. — A mesure que dans un jour serein le soleil s'approche de l'horizon, le ciel, dans la portion qui avoisine le soleil, se colore en jaune ou en rouge. Il blanchit près du zénith, et la clarté va en augmentant jusqu'à l'horizon occidental. Bientôt on remarque vers l'Orient, à l'opposé du soleil, une teinte rouge qui atteint son maximum au moment où le soleil descend au-dessous de l'horizon. Cette teinte circonscrit plus tard un segment plus ou moins déterminé, d'une couleur bleu foncé. La séparation entre le bleu et le rouge est le plus souvent assez tranchée; ce segment bleu constitue le crépuscule. Dans des circonstances favorables, on distingue entre le bleu et le rouge un liseré blanc ou jaune que Mairan a appelé second crépuscule, ou anticrépuscule. Une observation attentive prouve que le segment crépusculaire est dû à l'ombre de la terre, qui se projette sur le ciel. Cette projection n'étant plus éclairée que par la lumière diffuse qui est bleue, doit elle-même se colorer de cette teinte. A mesure que le soleil s'abaisse, le segment rouge du ciel occidental qui s'abaisse avec lui devient plus net, et l'on voit au-dessus de lui un espace blanc que l'on pourrait appeler, avec Brandes, lueur crépusculaire. Quelquefois, enfin, on aperçoit une lueur faible et blanchâtre qui illumine le ciel vers le nord-ouest et s'élève à une hauteur angulaire considérable. Cette lueur est due incontestablement à l'illumination secondaire que jettent sur le haut de l'atmosphère les couches d'air situées actuellement sous l'horizon et directement éclairées par le soleil; c'est cet espace atmosphérique, dont la lueur est due à des rayons qui ont déjà subi une première réflexion, que M. Biot nomme le second espace crépusculaire.

Reprenant les recherches de Brandes et de Lambert, M. Biot a

cherché dans ces derniers temps à déduire la hauteur de l'atmosphère de l'observation du crépuscule, mais ce mode de détermination est très inexact et très compliqué. On ne peut donc avoir aucune confiance dans les hauteurs de 43,000, 115,000, 160,000 mètres, que ces observations assigneraient à l'atmosphère. Les observations d'éclipses de lune, les phénomènes qui se produisent à l'entrée de cet astre dans l'ombre de la terre prouvent que la hauteur de notre atmosphère est au moins égale à 80,000 mètres. On ne peut affirmer rien de plus, en présence surtout des recherches de M. Petit, directeur de l'Observatoire de Toulouse, qui semble avoir démontré que les bolides, vus dans diverses villes le 9 juin 1841 et le 3 juin 1842, brillaient d'un éclat très vif à des hauteurs de 142,055 mètres, 301,349 mètres, c'est-à-dire bien en dehors des limites assignées à l'atmosphère terrestre.

Nous n'avons rien de particulier à dire relativement aux phénomènes de la réfraction de la lumière et de la scintillation des étoiles; nous renverrons pour ces deux points aux paragraphes 123 et 125, pages 160 et 164.

Arc-en-ciel. — Tout ce qui a été dit de nouveau sur ce phénomène remarquable, dont Descartes a donné le premier la théorie, est dû à M. Babinet; nous allons analyser l'important mémoire qu'il a publié sur ce sujet.

L'intensité de l'arc-en-ciel est d'autant plus grande que les gouttes de pluie, supposées toujours sphériques, qui le produisent, sont plus grosses; de là l'impossibilité de voir le troisième et le quatrième arc-en-ciel de la pluie, et des très minces filets d'eau cylindriques. Dans les circonstances les plus favorables, au Mont-Dore et sur le Canigou, ayant en face le soleil couchant, et au-dessous, dans l'ombre, des bois de pins formant un fond de tableau complétement noir, M. Babinet a inutilement cherché à voir le troisième arc-en-ciel, qui doit être vers 41° du soleil.

La formule de l'arc-en-ciel n'a été donnée dans aucun ouvrage. On calcule arithmétiquement les angles d'incidence et de réfraction pour les déviations maximum ou minimum (1), et l'on fait ensuite

(1) Les auteurs disent ordinairement que pour que le phénomène de l'arc-en-ciel se produise, il faut, et il suffit, que la déviation Δ soit un maximum

$$4r - 2i = 0,$$

ou bien :

$$6r - 2i = 0,$$

ou enfin :

$$8r - 2i = 0,\ 10r - 2i = 0,\ \text{etc.}$$

On peut cependant éliminer i et r, et obtenir la déviation ou le demi-diamètre Δ de l'arc-en-ciel à l'aide des équations suivantes :

$$\sin^2 \frac{\Delta}{2} = \frac{(4 - e^2)^2}{27e^4}$$

pour le premier arc-en-ciel, et pour le second par la formule :

$$\sin \frac{\Delta}{2} = \frac{e^4 + 18e^2 - 27}{8e^4} \text{ ou } \cos^2 \frac{\Delta}{2} = \frac{(e^2 - 1)(9 - e^2)^2}{64e^6}.$$

La première de ces formules, en y faisant $e = \frac{4}{3}$, donne

ou un minimum, et, par conséquent, qu'en appelant Δ' la déviation correspondante à un accroissement infiniment petit ι de l'angle d'incidence, le rapport $\frac{\Delta' - \Delta}{\iota}$ soit nul à la limite ; car ce rapport changeant de signe avec ι, dans le cas du maximum ou du minimum, doit être nul pour $\iota = 0$. Mais ces mêmes auteurs n'expliquent pas fort bien pourquoi la production du phénomène est liée à la condition de la déviation maximum ou minimum, on retrouvera peut-être ici avec plaisir la théorie de l'arc-en-ciel, telle que l'illustre Ampère la présentait dans ses leçons au Collége de France. On trouve par la méthode de Descartes que la déviation Δ est, après n réfractions, donnée par l'équation :

$$\Delta = 2\,nr - 2\,i - (n - 2)\,180°,$$

dans laquelle i et r sont les angles d'incidence et de réfraction. On a d'ailleurs, d'après la loi de la réfraction, et en appelant e l'indice de réfraction :

$$\sin i = e \sin r.$$

Pour qu'un rayon, après toutes ces réfractions, soit efficace ou produise le phénomène de la coloration, il faut que les rayons voisins, à droite et à gauche, éprouvent sensiblement la même déviation, de manière que, sortant parallèles, ils se réunissent en faisceaux. Il faut donc, en désignant par ι et ρ les accroissements très petits ou les diminutions très petites des angles d'incidence et de réfraction, que le rayon dont les angles d'incidence et de réfrac

$\Delta = 42^\circ\ 2'$, angle connu pour le premier arc-en-ciel; les deux autres pour cette même valeur de e donnent également l'angle connu du second arc-en-ciel $\Delta = 50^\circ\ 59'$.

Ces équations nous ont donné Δ au moyen du rapport de réfraction e; on pourrait réciproquement en déduire l'indice de réfrac-

tion seraient $i + \iota$, $r + \rho$ éprouve la même déviation Δ' que le rayon dont les angles sont i et r; or, les formules qui précèdent donnent :

$$\Delta' = 2n(r + \rho) - 2(i + \iota) - (n - 2)\ 180^\circ.$$
$$\text{Sin}\ (i + \iota) = e \sin (r + \rho),$$
$$\text{Sin}\ i \cos \iota + \sin \iota \cos i = e \sin r \cos \rho + e \sin \rho \cos r.$$

D'où :

$$\Delta' - \Delta = 2n\rho - 2\iota.$$

D'après ce que nous avons dit, ι et ρ étant supposés très petits, on doit avoir $\Delta' - \Delta = 0$. Donc :

$$2n\rho - 2\iota = 0,\ \frac{n\rho}{\iota} - 1 = 0$$

Comme ι et ρ sont très petits, on a sensiblement :

$$\text{Cos}\ \iota = 1,\ \cos \rho = 1,\ \sin \iota = \iota,\ \sin \rho = \rho,$$

Et par suite :

$$\text{Sin}\ i + \iota \cos i = e \sin r + e\rho \cos r;$$

Et parce que :

$$\text{Sin}\ i = e \sin r,$$

$$\iota \cos i = e\rho \cos r,\ \frac{\rho}{\iota} = \frac{\cos i}{e \cos r}$$

Et enfin :

$$\frac{n \cos i}{e \cos r} - 1 = 0,\ n \cos i = e \cos r.$$

Telle est donc la condition du phénomène. On en tire

$$\text{Sin}\ i = \pm \sqrt{\frac{n^2 - e^2}{n^2 - 1}}.$$

Pour rattacher cette condition à celle du maximum ou du minimum de déviation, il suffit de remarquer que si en un point il y a maximum ou minimum de déviation, la déviation pour les rayons qui avoisinent celui dont il s'agit est sensiblement la même, puisque, après avoir crû, elle décroît, ou qu'après avoir décrû elle croît de nouveau, ce qui n'a pas lieu pour tout autre point.

tion e, en partant de la valeur observée de Δ, par la méthode des approximations successives.

Si l'on prend un cylindre de verre de 10 millimètres de diamètre, et qu'on cherche vers 20°, et non vers 40° comme pour l'eau, à l'opposé du soleil ou de la lune, ou d'une bougie, on trouve un premier arc-en-ciel de très bonne qualité. Le second sera vers 90°; enfin, avec un peu de dextérité et beaucoup de patience, comme le disait Fresnel, on découvrira quatorze arcs-en-ciel, savoir sept de chaque côté. Si l'on note le troisième, qui est du côté et à peu de distance du point lumineux, qu'on mesure sa distance angulaire, ce qui se fera commodément en mesurant d'abord la distance du cylindre au point lumineux, et ensuite l'écart de cette partie de l'arc-en-ciel à droite et à gauche, on aura une détermination de Δ, dont on tirera avec exactitude l'indice de réfraction.

En faisant couler de l'eau, de l'alcool, de l'acide sulfurique, de l'éther, de l'eau salée par un trou cylindrique fait dans un morceau de verre ou de métal, on reproduira les angles météorologiques connus pour l'eau, et de plus l'on verra le troisième et le quatrième arc au moins, si le diamètre du cylindre liquide n'est pas trop petit.

Si le liquide est autre que l'eau, on déterminera, par la distance Δ du troisième arc-en-ciel, le rapport de réfraction.

M. Babinet a fait des arcs-en-ciel avec des cylindres de plusieurs substances douées de la double réfraction, telles que le quarz, le spath, le béryl, l'arragonite,..., et il a obtenu pour le premier arc-en-ciel un arc double, mais non pas pour le deuxième et les suivants. Ceci s'explique très bien par la loi de la tangente que Fresnel a trouvée par la théorie, pour la quantité de la lumière réfléchie polarisée extraordinairement par rapport au plan de réflexion; il résulte de cette loi qu'après plusieurs réflexions la lumière extraordinaire est incomparablement plus affaiblie que celle qui a le plan de réflexion pour plan de polarisation.

Le premier arc-en-ciel pour le soufre ou le diamant ne doit pas exister, car l'angle d'incidence i, donné par l'équation :

$$\sin i = \sqrt{\frac{4 - e^2}{3}}$$

devient imaginaire quand $e < 2$. Cette conclusion est remarquable et

mérite d'être vérifiée. M. Babinet n'a pu le faire, parce qu'il n'avait pas de cylindre de soufre transparent ou de diamant à sa disposition. La nature des rayons ordinaires et extraordinaires dans les arcs-en-ciel produits par des substances doublement réfringentes est d'accord avec les lois de la polarisation. L'on sait aussi que MM. Biot et Brewster ont reconnu que l'arc-en-ciel météorologique doit être et est polarisé comme par réflexion.

Les arcs nommés secondaires par M. Arago, ou surnuméraires par M. Young, sont des récurrences de couleurs intérieures à l'arc intérieur, extérieures à l'arc extérieur. Young les explique par l'interférence de deux rayons, lesquels avant et après l'incidence qui donne le minimum de déviation, subissent la même déviation tous deux. Venturi, pour expliquer ces arcs multiples, admettait des gouttes d'eau elliptiques ; l'explication de Young ne laisse rien à désirer.

On peut reproduire les arcs secondaires avec un filet d'eau cylindrique d'un millimètre de diamètre. On voit au premier arc-en-ciel seize arcs surnuméraires intérieurs, et au second environ neuf arcs extérieurs. On en voit aussi au troisième arc. La distance angulaire de ces arcs secondaires à l'arc principal donne avec exactitude le diamètre du filet cylindrique liquide.

M. Airy a récemment rattaché l'existence des arcs surnuméraires à la théorie des ondulations par une solution analytique, et M. Miller a vérifié les résultats et les formules de M. Airy sur les arcs surnuméraires que produit un rayon de soleil tombant horizontalement sur des filets d'eau cylindriques et verticaux de 1/2 à 1/3 de millimètre de diamètre.

Les phénomènes plus compliqués, mais très remarquables des *fils méplats*, ont beaucoup d'analogie avec ceux des arcs secondaires. On appelle méplats des fils de verre qu'on tire à la lampe en les écrasant, par un procédé quelconque, quand ils sont encore fondus. On en trouve qui, mis près de l'œil dans une chambre obscure éclairée par une seule ouverture linéaire d'un quart de mètre de large sur quelques millimètres de haut, donnent naissance aux plus brillants phénomènes d'interférence qu'on puisse imaginer, au point de faire vraiment spectacle. Les couleurs, qui d'ailleurs ne

sont pas symétriques de part et d'autre de l'ouverture éclairée par la lumière du jour, sont évidemment celles des arcs secondaires.

Des couronnes et des halos en général.

Quand la lumière qui vient des astres tombe sur des vapeurs condensées à l'état vésiculaire, ou en particules glacées, elle est diversement réfléchie et réfractée, et donne naissance à diverses séries de phénomènes, dont les principaux sont désignés sous les noms de couronnes, anthélies, halos, parhélies, cercle parhélique, etc.

Couronnes.

Les couronnes sont des cercles colorés concentriques au soleil et à la lune, d'un diamètre variable entre 1° 1/2 et 4° pour la couronne intérieure. Ces couronnes sont quelquefois au nombre de trois ou quatre, etc. Comme tous les phénomènes de diffraction, elles ont le rouge à l'extérieur et le violet à l'intérieur, disposition analogue à celle des couleurs dans le premier arc-en-ciel. Elles sont formées par de petites sphères ou globules d'eau liquéfiée, d'un diamètre uniforme, ou du moins tel qu'il y en ait un plus grand nombre d'une grosseur donnée que de toute autre. Le phénomène est d'autant plus net qu'il y a un plus grand nombre de ces particules égales, à l'exclusion de celles d'un autre diamètre. Newton paraît avoir attaché beaucoup de prix à découvrir la loi de ce phénomène, qu'il était impossible de trouver avant la connaissance des interférences. Young a été bien plus près de la vérité en disant que les diverses couronnes concentriques avaient des diamètres croissant comme les nombres 1, 2, 3, 4..., ce qui a été récemment confirmé par les observations de M. Délezenne, de Lille, faites au moyen de combinaisons bichromatiques de verres colorés. M. Babinet, faisant faire à la science un grand pas, formula, en 1832, dans son cours au Collége de France, la loi suivante : le produit du diamètre de chaque goutte d'eau ou globule, multiplié par le sinus du diamètre angulaire de la première couronne, est égal à l'intervalle fondamental des interférences donné par l'expérience, lequel pour la lumière de l'alcool salé est $\lambda = 0^{\text{mill.}},000588$. M. Babinet douta plus

tard de cette loi, conséquence nécessaire de la théorie, à cause de la dilatation du diamètre du premier ordre de couleurs qui a lieu dans la lumière blanche. Mais, depuis les observations de M. Délezenne, il a vérifié avec la lumière monochromatique de l'alcool salé, et avec des poussières et des globules d'un diamètre bien uniforme, la loi des diamètres successifs des couronnes, qui est bien celle des nombres 1, 2, 3..., et la loi que nous avons énoncée.

Si l'on regarde le soleil, la lune ou la flamme d'une lampe ou d'une bougie au travers d'un verre couvert de poussière de lycopode, on aperçoit de superbes couronnes concentriques, au nombre de trois ou quatre. L'on reproduit ainsi artificiellement et d'une manière plus parfaite le beau phénomène des couronnes. Cette observation est due au célèbre Young. Le *lycoperdon bovista*, la poussière de la mousse ordinaire, les globules du sang et ceux de la fécule, ainsi que les entrecroisements opaques de fils d'un diamètre uniforme, peuvent être substitués au lycopode.

Le principe d'optique, très paradoxal en apparence, qui donne la clef de ces phénomènes, peut s'énoncer ainsi : un point lumineux produisant son image ordinaire au fond de l'œil, si, hors de la ligne qui joint le point et l'œil, mais assez près de cette ligne, on place un petit obstacle opaque, l'effet de ce petit corps opaque sera exactement le même que celui d'une ouverture toute pareille illuminée par la lumière incidente, en sorte qu'autant le globule semble devoir produire d'opacité, autant en réalité il produit d'illumination. Ce paradoxe trouve son explication très facile dans la théorie des ondes. En effet, il résulte des interférences que la partie efficace d'une onde se réduit à un petit cercle, tel qu'entre le rayon direct venu du centre du cercle et celui qui vient de la circonférence de ce cercle, il y ait un quart d'onde de différence. Tout le reste peut être considéré comme s'entre-détruisant mutuellement par l'effet des interférences; mais si par l'interposition d'un globule vous supprimez une partie de cette onde nécessaire à la destruction des ondes élémentaires qui existent dans son voisinage, vous faites renaître celles-ci, que la partie supprimée ne détruit plus, et vous revenez au théorème ci-dessus, savoir, que le globule interposé produit autant d'illumination qu'il semble devoir en éteindre. Le carré de l'intégrale des petits mouvements dérivés détermine à

quelle position, à quelle distance angulaire cette illumination sera efficace, et quelle sera l'intensité de cette lumière à toutes les distances angulaires des particules considérées.

Appliquons ce principe très fécond à l'explication d'un phéno mène remarquable observé par le professeur Necker de Genève. Si le soleil se lève derrière une colline couverte d'arbres et de broussailles, le spectateur, situé dans l'ombre de la colline et près des rayons solaires qui vont bientôt l'atteindre, voit toutes les petites branches projetées sur le ciel, non pas opaques et noires, mais, au contraire, blanches, argentées et brillantes, comme si toute la végétation était d'argent mat, le mieux décapé possible, jusqu'à une hauteur de quelques pieds au-dessus de la colline. Sans la présence des petites branches, les ondes directes de la lumière intense du soleil passeraient inefficaces pour l'observateur, par-dessus la colline; mais les petits obstacles opaques deviennent, d'après le théorème ci-dessus, autant de parties lumineuses qui renvoient à l'observateur l'image en clair et en brillant, des obstacles noirs et opaques, car ceux-ci font naître autant de rayons dérivés effectifs qu'ils éteignent de rayons extincteurs.

La théorie mathématique donne aussi l'explication des globules voltigeant dans un rayon de soleil qui pénètre dans une chambre fermée, celle des couleurs des fils d'araignée et des fils minces de métal, etc. Dans tous ces cas divers, pour une couleur donnée dont la longueur d'onde, ou, si l'on veut parler indépendamment de toute théorie, dont l'intervalle fondamental des interférences est λ, le produit du diamètre du fil ou du globule par deux fois le sinus de la distance angulaire qui existe entre la lumière directe et la ligne qui va de l'œil au fil ou au globule, sera égal à la quantité λ.

Comme on est ordinairement trop ébloui par les rayons du soleil pour distinguer les colorations qui entourent son disque, le phénomène des couronnes se remarque le plus souvent autour de la lune. Pour l'observer autour du soleil, il faut se servir d'un verre noirci sur l'une de ses faces. Tous les nuages qui ne sont pas trop épais pour que la lumière du soleil puisse les traverser, les *cirrus* et les *cirro-stratus* exceptés, offrent des traces de couronnes; mais la vivacité des couleurs n'est pas toujours la même. Les brouillards qui pendant la nuit se forment dans les vallées, ou qui s'élèvent vers le

milieu du jour au sommet des montagnes, donnent des couronnes d'un éclat admirable de couleurs.

Anthélies.

On désigne en général sous le nom d'anthélies les couleurs vues par réflexion, ou plutôt par transmission rétrograde, par un voyageur placé de manière que l'ombre de sa tête porte sur un nuage, sur l'herbe, sur un champ de céréales, ou une autre surface couverte de rosée, etc. Le voyageur observe alors sous certaines conditions une auréole, dont la lumière est plus ou moins vive. Cette auréole est due à la réflexion de la lumière : la lueur est plus vive autour de la tête, parce que les molécules réfléchissantes, situées dans le voisinage de l'ombre de la tête, lui montrent toute leur portion éclairée, tandis que celles qui sont plus éloignées lui montrent des parties éclairées et d'autres qui ne le sont pas, ce qui diminue leur clarté proportionnellement à leur distance de la tête.

Les premières observations d'anthélies produites par les nuages sont dues à Bouguer, qui sur les Cordillières fut témoin de ce phénomène, et le décrivit le premier. M. de Lamartine, sur les sommités du Liban, vit aussi sa tête entourée d'une auréole lumineuse.

M. Babinet a observé des effets analogues dans les poudreries d'artillerie, lorsque sa tête faisait ombre sur une couche de poudre noire, sur des brouillards très bas dans les Landes, et sur des globules flottants au sein des eaux de quelques rivières de France de moyenne grandeur.

La théorie des anthélies est très facile. Tout le monde saura passer des phénomèues de transmission ou transparence qui donnent naissance aux couronnes, aux phénomènes de réflexion ou d'illumination rétrograde qni produisent les anthélies. Les mêmes formules d'interférence avec les mêmes différences de chemins parcourus s'appliquent de part et d'autre également.

Halos proprement dits.

Les halos proprement dits sont des cercles colorés qui ont le soleil pour centre. Le rayon du premier de ces cercles qu'on nomme halo ordinaire a un rayon de 22°. Le deuxième halo extraordinaire

est distant du soleil de 46°. Le troisième, beaucoup plus rare, et qui n'a été observé complétement que par Hével, est distant du soleil de 90°. Les deux premiers se distinguent des couronnes en ce que, comme dans les couleurs produites par la réfraction, le rouge est en dedans, tandis que les couronnes, dont le diamètre est d'ailleurs variable, ont le rouge extérieur, comme il convient aux phénomènes de couleurs auxquels la diffraction donne naissance. Dans le troisième halo cependant, le violet est plus rapproché du soleil que le rouge, ce qui le distingue des deux autres au premier aspect. M. Arago a tiré de l'oubli la théorie de Mariotte, qui admet que les halos sont produits par la réfraction minimum de prismes de glace, d'un angle de 60°, suspendus dans l'atmosphère. Les dimensions des cercles sont tout-à-fait d'accord avec cette explication. M. Arago l'a confirmée en montrant, au moyen du polariscope que lui a fourni sa polarisation chromatique, que la lumière des halos est polarisée par réfraction, c'est-à-dire dans un plan perpendiculaire à la ligne qui joint l'astre et le point du halo que l'on considère.

Pour bien comprendre la production de ces phénomènes, remarquons que, lorsqu'un rayon de soleil est réfracté par un prisme immobile, les rayons incidents et réfractés font entre eux un angle qui dépend de la substance, de l'angle du prisme, et aussi de celui sous lequel le rayon est incident. Si l'angle d'incidence varie, celui du rayon réfracté varie avec lui. Le calcul et l'expérience prouvent qu'il y a une position du prisme dans laquelle l'angle d'incidence peut varier, sans que la direction du rayon réfracté soit sensiblement changée.

Dans cette position, le rayon incident et le rayon réfracté font entre eux le plus petit angle possible : c'est la position du minimum de déviation. Imaginons maintenant une série de prismes identiques, placés les uns au-dessus des autres, de façon que leurs axes soient sur une même ligne droite, mais que sur l'inférieur le rayon incident coïncide avec la verticale, tandis que dans le deuxième il s'en écarte de 1°; dans le troisième, de 2°, etc. On verra sur une surface blanche placée derrière ces prismes une série de spectres, dont la distance horizontale va toujours en augmentant de bas en haut, de manière qu'elle est à peine sensible pour le plus bas, dans le voisinage du minimum de déviation. Si les axes de ces prismes

n'étaient point en ligne droite, mais inclinés de façon que tous les spectres coïncidassent avec une ligne horizontale, quelques uns se recouvriraient et formeraient de la lumière blanche. C'est seulement dans le voisinage du *minimum* de déviation que ces spectres ne se recouvriraient pas complétement. Il y a plus : les mêmes couleurs des différents spectres coïncideraient, et il en résulterait un prisme unique très coloré, où le rouge serait surtout très intense. Dans l'intervalle entre ce rouge et l'espace où tombe la lumière directe du soleil, il n'y a que de la lumière diffuse, et cet intervalle paraîtra obscur. Au lieu d'une série de prismes disposés verticalement les uns au-dessus des autres, imaginons-en un grand nombre diversement inclinés sur l'horizon ; chacun reproduira le même phénomène : seulement les spectres ne se recouvriront pas uniquement dans le sens horizontal, mais sur une ligne dont l'inclinaison dépend de celle des prismes. Si le nombre de ces séries est très grand, il en résultera à la fin un cercle lumineux où la couleur rouge sera en dedans, et où le bleu fort pâle passera au blanc clair. Ce cercle ne se produit que parce qu'un grand nombre de spectres sont placés l'un à côté de l'autre tout autour du soleil, et forment un tout continu.

Les petits cristaux de glace et les flocons de neige qui flottent dans l'atmosphère se ramènent à des prismes dont les angles seraient de 60°. Si un prisme de ce genre tourne sur lui-même dans l'atmosphère, il en part continuellement des rayons qui arrivent à notre œil pour disparaître immédiatement après ; mais il est évident que le rayon frappera l'œil le plus longtemps possible, quand sa déviation atteindra son minimum. Si le nombre de ces prismes est très grand, alors il arrivera que nous recevrons en même temps les rayons réfractés par un prisme au moment où ceux de l'autre disparaissent, de façon que l'impression sur notre œil sera permanente, quoique les rayons ne lui soient pas envoyés par les mêmes cristaux. Dans la position du minimum de déviation, on verra autour du soleil et de la lune un cercle brillant, rouge en dedans, d'un bleu pâle ou d'un blanc éclatant qui se confond avec l'azur du ciel en dehors. Comme un grand nombre des prismes qui entourent le soleil renvoient leurs spectres vers l'anneau coloré ou encore plus loin, nous ne recevons de cet espace que la lumière réfléchie par

les particules aériennes ou les faces des prismes, et il en résulte que cet espace est plus sombre que celui qui est en dehors du cercle.

L'expérience confirme toutes ces données de la théorie. Si l'on considère attentivement un halo, on verra que le bord interne se distingue par une couleur sombre mal définie, qui souvent est grisâtre, et d'autant plus marquée que le halo est plus brillant. Si l'on mesure la distance qui sépare le milieu du rouge du centre du soleil, on trouve qu'elle est comprise entre 20° 50′ et 22°. En calculant cette même distance d'après le pouvoir réfringent bien connu de la glace, nous trouvons exactement le même nombre, et ce calcul montre aussi que la lumière doit être très vive dans la position du minimum de cette déviation. En faisant tourner un prisme équilatéral autour de son axe, de manière que l'angle d'incidence croisse chaque fois d'un degré, on ne trouve que 120 positions possibles, et, parmi celles-ci, 20 seulement, par conséquent 1/6 du nombre total, qui soient telles que la lumière subisse le minimum de déviation, ou ne s'en écarte que de 40′.

Tout le monde est d'accord sur l'explication du halo de 22° de rayon, mais il n'en est pas de même pour le halo extraordinaire de 46 à 47° de rayon. Brandes croyait qu'il y a réfraction dans deux prismes situés l'un derrière l'autre; Fraunhofer suppose que les prismes à six pans se terminent par des pyramides à base hexagonale, dont les faces sont inclinées entre elles de 90°, et que le second cercle est un effet de la réfraction de la lumière dans ces pyramides. L'opinion de Brandes doit être rejetée; car, d'après cette hypothèse, le rayon du halo extraordinaire serait exactement double du rayon du halo ordinaire, et aurait pour valeur 43 à 44°. Cette valeur est décidément trop faible pour représenter l'observation. Reste l'hypothèse qui explique ce halo par une réfraction à travers un angle dièdre dont les faces sont inclinées de 90° l'une sur l'autre. M. Galle a démontré qu'il n'est pas nécessaire de recourir aux faces additionnelles par lesquelles Fraunhofer termine ses prismes hexagonaux, de manière qu'ils finissent par des pyramides sexangulaires. Il suffit de clore le prisme par deux faces perpendiculaires à l'axe de ce prisme, qui devient ainsi un prisme droit hexagonal. Chaque base du prisme, en se raccordant avec

chacune des six faces latérales, forme six angles de dièdres de 90° d'ouverture, et c'est au travers de ces angles dièdres que s'effectue pour des positions convenables des prismes, le brisement de lumière qui donne naissance au halo extraordinaire. Cette manière de voir est tout-à-fait conforme à ce que l'on sait de la cristallisation du givre ou de la neige.

On peut admettre, pour le troisième halo, que le rayon tombe sur le prisme, de façon que la surface postérieure le réfléchisse complétement et le réfracte après cette réflexion totale, comme pour l'arc-en-ciel.

Cercle parhélique.

La constitution atmosphérique qui donne naissance aux halos produit aussi quelquefois un cercle blanc parallèle à l'horizon, dont la largeur est la même que celle de l'astre illuminant, et dont la circonférence passe par le soleil ou par la lune. On remarque que la partie de ce cercle qui est intérieure au halo de 22° est beaucoup plus faible que la partie extérieure, c'est-à-dire celle qui est à une distance de l'astre plus grande que 22°. Pour rendre raison de ces apparences, il suffit d'admettre, ce qui est d'ailleurs démontré par l'existence des parhélies, la présence de prismes de glace dont l'axe est vertical et qui soient en plus grande abondance dans cette situation que dans toute autre. Les prismes, en traversant l'air, se disposeront par la loi de moindre résistance, de manière que leur axe soit vertical, ainsi que leurs faces latérales, si la plus grande dimension de ces prismes est suivant leur axe.

Les deux bases seront d'abord horizontales, et si l'axe est très court ou si le cristal très peu épais, très comprimé, forme une espèce de lame hexaèdre ou trièdre, il tombera en présentant le tranchant. Il en résultera qu'alors les deux bases seront à leur tour verticales et l'axe horizontal. Les faces verticales des prismes qui sont dans la première position, et les bases également verticales de ceux qui sont dans la seconde, peuvent donc être considérées comme autant de miroirs verticaux qui renvoient au spectateur la lumière réfléchie de l'astre illuminant, et qui en offrent une image située à la même hauteur que l'astre, et à une distance angulaire double

de l'angle que fait le rayon incident avec la face du miroir. Ainsi, une face verticale plane, dont l'azimut, par rapport à l'axe, est de 45°, réfléchit la lumière qui la frappe à une distance de 90° de l'astre; et comme il existe des faces verticales dans tous les azimuths possibles, il se forme une apparence lumineuse horizontale, de même longueur que l'astre illuminant, et incolore parce qu'elle doit sa naissance à la réflexion. Ce cercle blanc doit de plus être complétement polarisé à des distances convenables du soleil ou de la lune. Cette observation n'a point été encore faite dans la nature.

Le cercle horizontal, qu'on nomme aussi parhélique, doit passer par l'astre éclairant, puisque les faces spéculaires verticales des prismes qui le produisent donnent, quand elles font un très petit angle avec le rayon incident, une image de cet astre très peu distante de l'astre lui-même; et si cet angle est nul, l'image coïncide avec l'astre, ce qui n'augmente point cependant alors la lumière directe, parce que dans ce cas la projection de la face du prisme dans le sens du rayon incident est nulle.

Enfin, le moindre éclat du cercle parhélique dans l'intérieur du halo de 22° s'explique très bien en remarquant que dans l'intérieur du halo, lequel résulte d'une déviation ou réfraction minimum, aucun prisme ne peut ajouter par réfraction à l'illumination du cercle parhélique, tandis qu'en dehors de ce halo les prismes verticaux ajoutent de la lumière réfractée horizontalement à la lumière réfléchie horizontalement par les faces verticales.

Il se produit quelquefois une ligne verticale de lumière blanche qui passe aussi par l'astre, et qui, jointe à la portion du cercle parhélique intérieure au halo, quand cette partie existe seule, donne une croix blanche à branches verticales et horizontales, encadrée dans le halo. Cette croix peut même exister sans le halo, ce qui résulte et de l'observation et de la théorie. On peut voir dans le voyage récent du capitaine Back le dessin d'une jolie apparence lunaire comprenant la lune avec une croix blanche terminée au halo, un halo de 22° et quatre parasélènes aux quatre extrémités des branches de la croix. Ce phénomène est analogue à la traînée blanche verticale qui, dans les régions du Nord, précède l'apparition du soleil et se montre aussi au-dessous de lui quand il est élevé sur l'horizon. Pour l'expliquer, il faut recourir à la considé-

ration des prismes dont l'axe est horizontal, position que doivent affecter en tombant au travers de l'air ceux dont l'axe est très court comparativement aux dimensions de la base. Celles de ces faces qui appartiennent aux prismes dont l'axe horizontal est en même temps perpendiculaire au plan vertical passant par l'astre et l'observateur, doivent réfléchir et réfléchir seules dans ce même plan une série d'images formant une ligne lumineuse verticale passant par l'astre et s'étendant en dessus et en dessous. La cause qui rend incomplet ce phénomène et les autres du même genre, est, 1° la grande distance des nuages qui produisent par refroidissement les prismes de glace à leur partie supérieure : cette distance est telle que souvent d'autres nuages, chassés par le vent, passent entre l'observateur et les halos ; 2° la grande étendue angulaire de ces apparences, car le cercle parhélique fait souvent le tour entier de l'horizon. Il en résulte qu'une très grande étendue de surface de nuage coopère à leur production, et qu'un manque d'uniformité dans cette constitution atmosphérique fait naître de suite des modifications correspondantes dans les apparences qui en résultent.

C'est ce qui se voit plus manifestement encore quand on étudie par quelles périodes se développent et s'éteignent les diverses phases de ces phénomènes compliqués.

On a vu, mais très rarement, deux autres cercles blancs passant aussi par le soleil et se coupant sous un angle de 60° ; ils peuvent être engendrés par la réflexion des prismes qui font avec la verticale un angle de 60°.

Au reste, la variété de position que les prismes de glace ou de neige peuvent prendre dans l'espace suffit surabondamment pour compléter la théorie de tous les phénomènes avec couleurs ou sans couleurs qui accompagnent les halos.

Parhélies.

Les parhélies ou images du soleil existent toujours au point où deux cercles se coupent, et par conséquent là où il y a deux causes productrices de la lumière. Ils ont les couleurs du halo et souvent une sorte de queue ou prolongement, dont la direction coïncide avec celle du cercle horizontal ou parhélique dont nous avons parlé

plus haut. Des mesures exactes prouvent que les parhélies ne se trouvent pas exactement au point d'intersection des deux cercles, mais qu'ils sont un peu plus éloignés du soleil. Venturi explique cette circonstance en disant que la réfraction dans les prismes verticaux ne se fait pas exactement dans un plan perpendiculaire aux arêtes. Si l'on développe cette idée par l'analyse, on voit que le parhélie doit s'éloigner d'autant plus du soleil que celui-ci s'élève davantage au-dessus de l'horizon. Non seulement l'expérience le démontre d'une manière générale, mais la différence entre les valeurs observées et celles que donne le calcul sont si petites, que l'on peut considérer cette opinion comme parfaitement exacte.

Nous empruntons à M. Bravais la théorie suivante des parhélies et des cercles circumzénitaux, ou des cercles qui, ayant le zénith pour centre, sont tangents aux halos ordinaire et extraordinaire.

Concevons un grand nombre de prismes de glace dont l'axe soit vertical, et dont l'angle dièdre soit de 60°. L'angle dièdre pourra se présenter au soleil d'une infinité de manières différentes. L'une d'elle est remarquable, c'est celle où le rayon, en traversant l'intérieur du cristal, est perpendiculaire à la ligne horizontale qui divise cet angle dièdre en deux parties égales. La déviation totale, somme des déviations d'entrée et de sortie, est alors la plus petite possible, et à cause du minimum le rayon émergent change à peine de lieu si l'on fait tourner l'angle dièdre autour de son arête verticale, comme charnière, d'un nombre considérable de degrés, soit dans un sens, soit dans un autre. Il se trouve donc alors, comme dans la théorie de l'arc-en-ciel et celle des halos, un grand nombre de rayons sortants dans la même direction, et selon la locution consacrée, ces rayons sortent efficaces; de là la production d'un parhélie. La branche médiane de la route brisée du rayon lumineux à déviation minimum, est placée symétriquement par rapport aux faces verticales d'entrée et de sortie : ainsi, quelle que soit la hauteur angulaire du rayon immergent par rapport à l'horizon, celle du rayon émergent doit être la même. Le parhélie sera donc aussi élevé au-dessus de l'horizon que l'est lui-même le véritable soleil. Quant à l'amplitude de la déviation, il est facile de voir qu'elle est d'autant plus grande que l'astre est plus élevé; car l'incidence de ses rayons sur les faces verticales du prisme devient, par ce fait

seul, de plus en plus oblique, ce qui détermine une augmentation de plus en plus croissante dans les angles de déviation. Si le soleil est à l'horizon et si le rayon traverse le prisme perpendiculairement au plan vertical qui bissèque son angle dièdre, la déviation atteint son minimum absolu d'environ 22°, et le parhélie se trouve alors à l'intersection du halo ordinaire et du cercle horizontal qui passe par le soleil. Dans tout autre cas, le parhélie s'écarte en dehors du halo ordinaire, et cet écart latéral croît avec la hauteur de l'astre.

Supposons qu'il s'agisse maintenant d'expliquer l'arc circumzénithal qui s'est montré tangent au halo ordinaire, et admettons, pour fixer les idées, que le soleil soit dans le méridien; dirigeons les axes horizontaux des prismes de telle sorte qu'ils soient parallèles à la ligne est-ouest, et par conséquent perpendiculaires au méridien. Tout système de cristaux à axes parallèles doit donner naissance à deux parhélies, comme nous venons de le voir. Pour découvrir comment ils seront situés, il suffit de faire tourner le soleil et les prismes tout d'une pièce autour de la méridienne de l'observateur, d'un angle de 90°; les cristaux deviennent verticaux, le plan du méridien devient l'horizon, la position des deux parhélies est aussitôt connue d'après les règles données plus haut. Réduisons maintenant tout le système et ramenons-le à la première position; il est visible qu'un des parhélies sera situé à 22° au-dessus du soleil, et le second à 22° au-dessous. On voit donc que le cas actuel ne diffère du précédent que parce que le plan du méridien joue le rôle que jouait naguère le plan de l'horizon.

Considérons un second système de prismes dont les axes, parallèles entre eux, soient dirigés de l'est 1° sud à l'ouest 1° nord. Le plan vertical passant par l'observateur et perpendiculaire à ces prismes aura pour azimuth le sud 1° ouest; le soleil, toujours au méridien, sera donc à gauche de ce plan. Effectuons un rabattement analogue à celui du cas précédent, et faisons tout tourner autour de la ligne horizontale dont l'azimuth est le sud 1° ouest; le plan vertical sud 1° ouest, après le rabattement, est confondu avec l'horizon; le cercle parhélique est donc un petit cercle de la sphère passant par le soleil et parallèle à ce grand cercle vertical. Le parhélie correspondant sera placé sur ce petit cercle, à une distance

angulaire un peu plus grande que 22°, l'excès de la distance étant d'autant plus grand que la distance du soleil au vertical sud 1° ouest est plus grande elle-même.

Le système des prismes perpendiculaires au plan vertical dont l'azimuth est le sud 2° ouest, donnerait aussi deux parhélies, l'un supérieur, l'autre inférieur, extérieurs tous deux au halo; et comme la distance angulaire du soleil à ces différents cercles verticaux sud 1° ouest, sud 2° ouest,... va sans cesse en croissant, l'écart des parhélies correspondants hors du halo ordinaire s'accroît simultanément. Si donc nous considérons maintenant la série formée par tous ces parhélies, nous verrons facilement qu'ils forment deux courbes distinctes qui touchent le halo ordinaire, l'une à son point de culmination, l'autre à son point le plus bas, et que ces courbes sont extérieures à ces halos. Ces deux courbes sont les arcs tangents circumzénithaux du halo ordinaire, qui, de la sorte, se trouvent complétement expliqués. Quant à la prédominance des prismes à axes horizontaux, elle résulte très probablement de ce que ces prismes, étant peu allongés relativement aux dimensions de leurs bases, et formant une sorte de lame hexaèdre, doivent tomber dans l'air en présentant le tranchant.

L'arc tangent du halo extraordinaire ne peut s'expliquer de la sorte; cet arc résulte pour M. Galle de la réfraction des rayons dans des cristaux dont l'axe est vertical; les rayons, après avoir pénétré par l'une des six faces verticales, ressortent en traversant l'hexagone qui forme la base inférieure du cristal. Pour l'explication complète du phénomène, il faut admettre en outre que ces prismes éprouvent de petits balancements autour de la verticale. L'éclat de cet arc varie avec la hauteur du soleil, et l'époque la plus brillante de l'apparition est, d'après M. Galle, celle où l'élévation de l'astre est de 21° 57′. Les rayons traversent alors les prismes dans des conditions qui réalisent sa déviation minimum, et la lumière divergente est efficace.

Halo.

Ce que l'on désigne ordinairement sous le nom de halo est un phénomène tellement compliqué, qu'il est difficile de le décrire; peu

d'observateurs l'ont vu complet; il arrive même que pendant le temps de l'observation les apparences du phénomène changent. Voici l'énumération des parties principales du halo, parties dont nous avons déjà donné l'explication.

1° Un anneau vertical de 22° de diamètre dont le soleil occupe le centre, coloré en rouge en dedans, d'un bleu pâle à l'extérieur. Lovitz a vu ce cercle unique remplacé par deux cercles qui se coupaient en haut et en bas. En Norvége, on a vu trois cercles; suivant Aepinus, ces cercles seraient assez communs.

2° Un second et quelquefois un troisième cercle vertical, dont le soleil est le centre, et qui sont aussi colorés. Le second cercle offre en général des couleurs plus tranchées que le premier; son diamètre est un peu plus du double.

3° Un cercle horizontal blanc passant par le soleil en faisant le tour de l'horizon.

4° Plusieurs parhélies placés ordinairement aux points d'intersection des divers cercles lumineux. Lovitz en a vu cinq, situés tous sur le cercle horizontal ou parhélique. Les deux premiers se trouvaient près de l'intersection du halo ordinaire avec le cercle parhélique, et paraissaient colorés, le côté rouge tourné vers le soleil; ils avaient des prolongements brillants qui s'étendaient sur le cercle horizontal; il en partait des arcs colorés qui n'ont jamais été revus par personne. Le troisième parhélie était placé sur le grand cercle horizontal en face du soleil: il était d'un blanc pâle. Le quatrième et le cinquième, situés sur le cercle parhélique à droite et à gauche du troisième, à la distance de 22° environ, étaient également blancs: tous les observateurs sont d'accord là-dessus. On les voit plus rarement; ils paraissent exister aux points d'intersection du troisième halo ou d'un cercle d'environ 90° de rayon, dont le soleil est le centre, avec le cercle horizontal.

5° Deux arcs de cercle tangents au halo ordinaire au point culminant et au point le plus bas et tournant leur convexité au soleil. A ces deux points, le cercle de 22° brille souvent d'un tel éclat que l'œil a de la peine à le soutenir.

6° Deux cercles tangents au halo extraordinaire au point culminant et au point le plus bas.

7° Deux arcs de cercle passant probablement par le troisième

parhélie et le soleil, ou peut-être par le troisième parhélie et le point culminant du halo ordinaire.

8° Deux autres cercles tangents au halo extraordinaire en des points distants du point le plus bas d'environ 60°.

9° M. Lambert a observé à Wetzlar, au mois de juin 1838, un halo vraiment extraordinaire par la présence de six parhélies sans cercle parhélique. Ce dernier cercle était remplacé par un second cercle horizontal ayant le zénith pour centre. Des six parhélies, deux se trouvaient sur le halo ordinaire à la même hauteur que le soleil; un, au point où le halo ordinaire était touché par le second cercle zénithal; deux, aux points d'intersection du halo extraordinaire avec le second cercle zénithal; le sixième enfin, au point de contact du premier cercle zénithal avec le halo extraordinaire. Quelles devaient être la disposition, la forme, les dimensions probables des prismes de glace qui donnaient naissance à ce curieux phénomène? Il ne serait peut-être pas facile de le dire *à priori*; mais il n'en est pas moins vrai que la théorie de Mariotte est probable, et que toutes ces apparences si variées sont dues à la réflexion et à la réfraction de la lumière produite par des prismes qui flottent dans l'atmosphère.

Par des expériences curieuses que nous allons rappeler, et en reproduisant artificiellement une partie au moins de ces phénomènes, MM. Babinet et Brewster ont donné un nouveau degré de probabilité à cette importante théorie. Elle ne sera complète et certaine que lorsqu'on aura obtenu, à l'aide de cristallisations convenablement choisies, toutes les particularités des halos : jusque là la cause et même la nature ou la forme de quelques unes des parties composantes du météore seront enveloppées d'obscurité.

Tous les cristaux fibreux, le saphir, la topaze, le quartz fibreux, etc., taillés perpendiculairement à l'axe, donnent naissance à un cercle passant par le soleil, par la lune, ou par la flamme de la bougie ou de la lampe qu'on regarde au travers. Le cercle a son plan perpendiculaire à la direction des fibres, et son diamètre varie à mesure qu'on augmente l'inclinaison entre la direction de l'axe ou des fibres du cristal et les rayons incidents. Si l'on met ces fibres miroitantes verticales, comme les axes des prismes qui donnent le cercle parhélique, on obtient artificiellement un cercle incolore, hori-

zontal, convenablement polarisé, passant par le centre lumineux. Si, au moyen d'un bel échantillon de cristal fibreux, par exemple d'aigue marine ou de tourmaline, on regarde l'image colorée du soleil transmise par un prisme de flint-glass placé devant le cristal, on obtient une des plus belles apparences de l'optique. Les diverses couleurs se déploient alors en cercles concentriques analogues aux plus brillants effets d'arc-en-ciel, et l'on peut, au moyen d'un léger déplacement de l'axe du cristal, mettre à volonté le rouge ou le violet au-dedans de la bande circulaire, et passer de la disposition des couleurs qui appartient au premier arc-en-ciel à celle qui est spéciale au second, c'est-à-dire le rouge en dedans. Si l'on intercepte une partie des rayons colorés du spectre, on peut ensuite mêler les autres par un procédé très simple. Si, par exemple, on met devant une bougie un verre jaune, et devant une autre bougie un verre bleu, et qu'on dispose le cristal de manière à faire coïncider les deux cercles parhéliques, on aura un cercle parhélique de couleur verte, provenant du mélange du jaune et du bleu.

Pour vérifier que le diamètre du cercle parhélique est double de l'angle formé entre l'axe ou les fibres du cristal et le point lumineux, placez trois bougies équidistantes. Au moment où le cercle parhélique de celle du milieu se réduit à un point, parce que l'axe est dirigé sur cette bougie, les deux cercles parhéliques des bougies extrêmes coïncident.

La possibilité de voir nettement, au travers du cristal, des objets quelconques, en même temps que le cercle parhélique traverse le champ de la vision, a permis à M. Babinet de prendre quelques mesures de distance et de halos par la mesure du déplacement de l'axe du cristal, déplacement qui, comme nous venons de le voir, est toujours égal à la moitié du diamètre du cercle parhélique.

M. Brewster a reproduit les halos en regardant le soleil à travers un verre recouvert d'une cristallisation d'alun.

On obtient les traînées lumineuses verticale et horizontale qui, dans les régions polaires, accompagnent quelquefois le soleil à son lever, et la croix qui résulte de l'intersection de ces traînées, en regardant le soleil à travers une toile métallique ou une surface de verre rayée; elles seraient donc un phénomène de réseaux.

Polarisation de l'atmosphère.

Si l'on dirige vers le ciel le polariscope chromatique de M. Arago, ou le polariscope à franges de Savart, on reconnait que l'intensité de la polarisation est très intense vers le zénith, qu'elle va en croissant jusque vers 90° du soleil; après quoi elle diminue progressivement jusqu'à une distance de 150° de cet astre, du moins si ce dernier est peu élevé au-dessus ou peu abaissé au-dessous de l'horizon; en ce lieu la polarisation est insensible. Ce point, placé dans le vertical du soleil, situé à environ 30° au-dessus du point opposé à cet astre, a été désigné sous le nom de point neutre. M. Arago, qui le découvrit, attribua avec raison son existence à l'influence de la lumière réfléchie par les diverses parties illuminées de l'atmosphère. Imaginons, en effet, un plan passant par le soleil et l'observateur; la lumière venant du soleil qui arrive à l'œil de ce dernier, suivant une certaine droite située dans ce plan, a été réfléchie par les molécules aériennes situées sur le trajet de cette droite; cette lumière doit donc être polarisée dans un plan passant par le soleil. Ce qui confirme cette explication, c'est que le point neutre se déplace, et sort considérablement du vertical opposé au soleil, quand la régularité du phénomène est troublée par des nuages qui occupent un côté de l'atmosphère. Au-delà du point neutre, la polarisation recommence à croître; mais le plan de polarisation, au lieu de coïncider avec le vertical du soleil, lui est devenu perpendiculaire. MM. Arago et Forbes attribuent ce dernier phénomène aux réflexions secondaires qui s'opèrent entre les molécules aériennes prises deux à deux. Il est visible, en effet, que, par rapport à une molécule d'air, le reste de l'atmosphère joue le rôle d'un corps éclairant en forme d'anneau horizontal qui l'environnerait de toutes parts. La portion de lumière que la molécule emprunte à cette cause doit donc être polarisée dans un plan horizontal, ou du moins peu incliné sur l'horizon, et dans tous les cas, ce plan doit, par une raison de symétrie, être perpendiculaire au vertical du soleil, si la molécule est elle-même située dans ce plan. A mesure qu'on examine des parties du ciel plus rapprochées du point de l'horizon opposé au soleil, la polarisation doit aller et va

réellement en croissant, et elle finit par l'emporter sur la polarisation verticale, laquelle va, au contraire, en diminuant, puisque l'incidence des rayons solaires approche de plus en plus d'être normale à ces mêmes molécules.

M. Babinet a découvert un second point neutre, dont la théorie est la même, et qui est placé au-dessus du soleil, quand celui-ci est près de l'horizon, à peu près à la même hauteur que le point neutre de M. Arago.

L'existence de ce point neutre a été constatée par un grand nombre d'observateurs, entre autres par M. Forbes, d'Édimbourg, un des plus savants météorologistes de notre époque.

M. Arago a reconnu il y a bien longtemps qu'à mesure que l'astre descend au-dessous de l'horizon, le point neutre s'élève au-dessus de ce plan, avec une régularité telle qu'en déterminant sa position, on peut en déduire assez bien celle du soleil lui-même.

Lors de l'éclipse partielle du 8 juillet 1842, M. Babinet se proposait de rechercher si l'inégalité d'illumination de l'atmosphère pendant l'éclipse aurait transporté le point neutre de M. Arago hors du vertical opposé au soleil.

Malheureusement pendant l'éclipse le ciel fut couvert de nuages. La veille, au contraire, l'atmosphère était d'une rare pureté, et M. Babinet put constater à son tour qu'après le coucher du soleil, le point neutre opposé à cet astre montait considérablement dans l'atmosphère, tandis que celui qui se trouve au-dessus du soleil s'abaissait sensiblement, mais bien moins cependant que l'autre ne s'élevait.

On doit donc regarder comme un fait hors de doute qu'à mesure que le soleil s'abaisse au-dessous de l'horizon, le point neutre de M. Arago s'élève de plus en plus dans la partie opposée du ciel, tandis que l'autre point neutre s'abaisse de plus en plus, quoique cependant d'une quantité moindre. La cause bien connue de ces points neutres suffira sans doute à expliquer facilement cette circonstance accessoire du phénomène.

Il ne faut pas oublier, comme M. Arago l'a fait observer dès l'origine, que, dans l'étude de la polarisation de l'air, la présence de la neige et en général l'état de la surface du sol concourent, par les radiations et les réflexions propres qui en proviennent, à la distribution des plans suivant lesquels la polarisation dominante

en chaque point de l'atmosphère paraît dirigée. Ainsi, par exemple, dans les observations faites après le coucher du soleil, l'on voit des bandes polarisées produites par la seule radiation des corps terrestres.

Rayons crépusculaires.—Bandes polaires.— Quand un nuage intercepte la lumière d'une partie de l'atmosphère, il projette une ombre qui obscurcit une partie de ciel. Le phénomène inverse est bien plus commun ; en effet, quand le ciel est couvert en grande partie de nuages, et surtout de *cumulo-stratus* interrompus par des éclaircies, alors le soleil luit au travers, et l'air, la vapeur vésiculaire, la poussière et les autres corps qui nagent dans l'atmosphère semblent des rayons plus ou moins lumineux qu'on a désignés sous le nom de rayons crépusculaires. Si le soleil est peu élevé au-dessus de l'horizon, ces rayons partent du soleil ; s'il est, au contraire, près de se coucher, ils s'élèvent dans l'atmosphère sous forme d'arcs de grands cercles qui se couperaient dans un point situé au-dessous de l'horizon et sur la droite qui joint le centre du soleil à l'œil de l'observateur. Ces rayons sont parallèles entre eux, et leur courbure apparente, de même que leur divergence dans le voisinage du zénith, ne sont qu'une conséquence des effets de perspective : plus ils sont éloignés de nous, moins leur écartement semble considérable, parce que l'angle visuel devient plus petit ; c'est la même illusion qu'on éprouve dans une allée bordée de deux rangées d'arbres parallèles qui semblent cependant se rapprocher à leur extrémité.

On dit ordinairement que les rayons crépusculaires annoncent la pluie, et il en doit être ainsi naturellement, car ils apparaissent surtout lorsque l'atmosphère est chargée de vapeurs, c'est-à-dire lorsqu'il y a de grandes chances de pluie.

On a désigné sous le nom de bandes polaires cette disposition particulière des nuages qui leur donne la forme et la position des arcs des aurores boréales. M. Bravais a eu de nombreuses occasions d'étudier dans les régions boréales ce phénomène, qui est assez fréquent, mais généralement moins tranché dans nos contrées. On le désigne à Lyon sous le nom d'arcs de Saint-André. Ces arcs ne sont pas toujours formés par des zones continues ; les lacunes sont peut-être occupées par des nuages diaphanes. Les arcs ne sont d'ailleurs pas toujours nettement limités en forme de barre ; ils sont plus souvent diffus comme des balayures ; dans d'autres circonstances, ils

sont composés de flocons arrondis et alignés suivant des axes déterminés à la manière des grains d'un chapelet. Les bandes polaires ont généralement une marche très lente ; elles sont presque toujours poussées par un vent dirigé dans le sens de leur longueur, quelle qu'en soit d'ailleurs l'orientation. L'épithète de polaire ne doit pas être prise par rapport aux points astronomiques du même nom, mais seulement par rapport aux points de convergence, qui deviennent en quelque sorte de véritables pôles dont les arcs seraient les méridiens. L'élévation des bandes est telle, en général, qu'elles ne sont jamais affectées par les vents inférieurs. Un mistral violent régnait à Valence, dit M. Fournet, et dans toute la vallée du Rhône, pendant que des bandes polaires d'une régularité parfaite stationnaient au-dessus de la ville avec une remarquable immobilité, élançant leurs ramifications depuis le zénith des montagnes de l'Ardèche jusqu'à celui de la plaine. Les bandes polaires peuvent apparaître à toutes les heures de la journée ; mais les plus belles et les plus symétriques se manifestent le matin et le soir, lorsque les effets de la chaleur solaire n'ont pas encore produit ou bien ont cessé de produire les courants ascendants qui paraissent jeter de la perturbation dans le phénomène.

MM. Arago et Laugier ont eu occasion d'observer les bandes polaires à Paris, dans la soirée du 23 juin. Vers 8 heures 20 minutes du soir, le ciel étant presque entièrement couvert, on vit se dessiner du côté du sud, sur une couche presque uniforme de nuages, un arc en apparence circulaire, sombre, régulier et très étendu, qui cependant ne se continuait ni vers l'orient, ni vers l'occident, jusqu'à l'horizon. Cet arc devint de plus en plus noir et de plus en plus défini. Un arc blanchâtre se forma bientôt le long de la bordure intérieure de l'arc sombre, mais non dans toute son étendue. Au-dessus et au-dessous de ce phénomène, les nuages semblaient éprouver une agitation singulière. Les deux arcs noir et blanc, toujours contigus, s'élevèrent graduellement au-dessus de l'horizon. Vers neuf heures, ils atteignaient le zénith, après s'être notablement affaiblis. Ensuite ils disparurent. Le point culminant de l'arc parut être dans un plan vertical formant avec le méridien, vers l'est, un angle d'environ 20 degrés. Dès que cette orientation eut donné au phénomène un caractère magnétique, M. Laugier observa

de minute en minute la boussole des variations diurnes : elle n'éprouva aucune perturbation. On aperçut sur divers points de l'arc des traces de polarisation qui évidemment ne provenaient pas de la lumière de la lune : il reste à chercher si la lumière crépusculaire n'en était pas la cause.

M. Fournet croyait avoir été témoin du même fait à Condrieux, sur les bords du Rhône. Vers 10 heures 25 minutes, des colonnes d'une blancheur et d'une uniformité remarquables, nettement séparées les unes des autres, régulièrement espacées sur toute l'étendue visible du ciel, s'étendaient en travers du bassin du Rhône. La partie ouest plongeant derrière le Pila était invisible ; mais vers l'est, les bandes convergeaient du côté des Alpes, en un point que son éloignement, ainsi que la soudure apparente des colonnes, rendait confus.

Persuadé qu'à Paris et à Condrieux le phénomène observé était identiquement le même, M. Fournet fait remarquer que ce jour-là les bandes polaires avaient acquis un développement considérable, puisque la distance de Paris à Condrieux est de 94 lieues. Dans cette hypothèse, les arcs noirs vus à Paris auraient été les portions de la voûte céleste intermédiaires entre les colonnes blanches nuageuses, et l'intensité de leur teinte n'eût été qu'un simple effet de contraste produit par l'éclat assez vif des bandes polaires. M. Arago repoussa avec force cette opinion. Il affirme hautement que les arcs noirs vus à Paris n'étaient certainement pas les portions de la voûte céleste intermédiaires entre les colonnes blanches nuageuses. Il ne comprend pas qu'on ait pu croire un instant que deux astronomes se seraient mépris à ce point de confondre des éclaircies avec des nuages, et cela dans leur observatoire, avec tous les secours qu'on y trouve, alors qu'ils étaient aidés de la lumière crépusculaire et de celle de la lune, et qu'ils avaient étudié le phénomène avec le secours de lunettes et de plusieurs instruments de polarisation. L'illustre directeur de l'Observatoire de Paris affirme, en conséquence, que les arcs de Condrieux et ceux de Paris n'avaient rien de commun. Il insinue donc que le phénomène observé à Paris n'appartient pas aux bandes polaires ; qu'il est très rare, si même, tout considéré, il serait possible d'en citer un second exemple.

En terminant ce résumé rapide, qu'on nous permette de rappeler

quelques réflexions que nous avons déjà développées ailleurs, et dont l'importance n'a pas été suffisamment comprise. Malgré les constants efforts de quelques savants expérimentateurs, l'enseignement de la physique a pris presque partout une fausse direction, et s'est réduit trop souvent à l'exposition pénible d'un nombre indéfini de formules de correction, au calcul d'expériences que les auditeurs ne répéteront jamais, à l'étude mathématique d'instruments dont l'usage sera toujours très borné. On a semblé quelquefois avoir oublié que le but de la physique est l'explication des phénomènes de la nature, et que les expériences mêmes de cabinet ne peuvent avoir pour objet que de fournir les données nécessaires à cette explication. Pour prouver que l'abus dont nous parlons était bien réel, il suffirait de dire qu'on avait réduit à quelques pages la plus intéressante partie de la physique, la météorologie, cette science dont l'étude conduit à approfondir d'une manière aussi agréable qu'utile les théories de la chaleur, de la lumière, de l'électricité, du magnétisme, etc., etc. La météorologie se lie si intimement à toutes les parties de la physique, que l'on pourrait, que l'on devrait peut-être prendre ses phénomènes pour point de départ d'un cours de physique; et ce cours, loin d'être sec, aride, décourageant, serait plein d'intérêt, parce qu'il ferait une application continuelle de la théorie à des faits qu'on a sans cesse besoin d'expliquer. Pour ne citer ici que la lumière, n'est-il pas vrai que dans notre résumé trop abrégé d'optique météorologique, nous avons vu la réflexion, la réfraction, les interférences, la diffraction, la polarisation, etc., etc., se manifester en grand, si nous pouvons nous exprimer ainsi, et donner naissance aux plus curieux phénomènes? La théorie si délicate et si abstraite des interférences n'a-t-elle pas pris un intérêt tout nouveau quand nous l'avons vue continuellement en jeu dans la nature, devenir, suivant l'explication de M. Arago, la cause unique du phénomène de la scintillation des étoiles; et ne se sent-on pas plein de courage pour en aborder les difficultés, quand on sait qu'elle a permis au même savant de mesurer la différence presque infiniment petite qui existe entre les réfractions produites par l'air sec et par l'air humide, qu'elle lui promet la mesure de la température absolue de l'air, etc., etc.? Comme contre-poids à cette ardeur mathématique qui a trop prévalu, il serait utile d'opposer

une étude plus longue et plus sérieuse de la météorologie : telle doit être la conclusion pratique de ces réflexions, qu'on nous pardonnera. Personne n'osera nous accuser de dédaigner les sciences abstraites, dont l'étude a fait l'une des plus douces occupations de notre vie, qui nous ont fourni la matière d'ouvrages devenus classiques dans l'Europe entière : les difficiles et glorieuses recherches par lesquelles les Dulong, les Petit, les Desprez, les Regnault, les Wertheim, etc., se sont efforcés de déterminer avec quelque rigueur ce que l'on nomme aujourd'hui les constantes de la physique, les coefficients de dilatation ou d'élasticité de l'air, des gaz, des vapeurs, du verre, des métaux, etc., la chaleur latente des corps, les indices de réfraction des substances transparentes, les poids atomiques des corps simples et composés, etc., etc., ne nous ont pas trouvé indifférent. Loin de là, nous avons applaudi sincèrement à ces grands travaux, sans nous faire cependant illusion sur l'importance des résultats qu'on doit en attendre ; mais nous avouons que nous sommes plus disposé à encourager les efforts des physiciens qui, en trop petit nombre, se consacrent tout entiers à l'étude approfondie, pratique, des faits de la nature ; qui, unissant la synthèse à l'analyse, s'efforcent dans leur laboratoire de reproduire sur une petite échelle, mais avec toutes leurs circonstances fondamentales et essentielles, les phénomènes dont ils ont été les témoins. Dans l'état présent de la science, dans la disposition actuelle des esprits, dans cette tendance à l'abstraction qui a envahi le domaine des sciences d'observation, on déclarera que ces derniers travaux sont moins savants, ou sont doués à un moindre degré du caractère scientifique ; ils fixeront à peine l'attention des corps savants ; mais l'avenir leur appartient, et l'on proclamera un jour qu'ils étaient plus féconds et plus durables. Des déterminations plus exactes des constantes de la physique remplaceront un jour les déterminations actuelles, et ce genre de progrès ne servira qu'à nous désespérer en nous montrant notre ignorance, en nous prouvant jusqu'à l'évidence que le passage de nos théories abstraites à la connaissance intime des corps est comme un abîme infranchissable. Ainsi, par exemple, nous avions, il y a quelques années à peine, la prétention d'évaluer des dixièmes de degré, et depuis les recherches plus approfondies sur la dilatation des gaz, l'élasticité du verre, etc., nous avons acquis la déplorable

conviction que les erreurs d'observation peuvent atteindre même un degré. Ces thermomètres dont nous étions si fiers, qui nous inspiraient tant de confiance, nous voilà réduits à nous en défier ; leurs points fixes sont devenus mobiles, et ils sont pour nous comme des protées qui nous échappent quand nous croyons les saisir.

Ils sont donc bien plus heureux, ils ont donc des droits plus certains à la reconnaissance de la science future les physiciens qui nous ont révélé les secrets de la nature, qui ont comme partagé sa puissance, qui en sont devenus du moins les imitateurs, et voilà pourquoi nous nous sentons entraîné vers eux par la plus vive sympathie. La reproduction artificielle de l'arc-en-ciel, des parhélies, du cercle parhélique, des halos, des couronnes, etc., etc., la réalisation des trombes et des divers météores à la fois métriques et aqueux, etc., sont pour nous de grandes découvertes ; on les a remarquées à peine, et cependant elles suffisaient seules pour placer leurs auteurs, MM. Babinet, Peltier, etc., au rang des physiciens justement célèbres.

QUATRIÈME SECTION.

RÉSUMÉ D'OPTIQUE MINÉRALOGIQUE.

On désigne sous ce nom la science des propriétés optiques des minéraux, ou des phénomènes auxquels les minéraux donnent naissance par leur action sur la lumière.

Les phénomènes qui servent principalement à caractériser les minéraux se rattachent aux divisions suivantes : réfraction simple ou double ; polarisation ordinaire ; polarisation chromatique, pouvoir dispersif ; absorption, avec ou sans polarisation ; dichroïsme et polychroïsme ; phénomènes analogues aux réseaux, couronnes, astéries, etc.

Réfraction simple.

L'observation de l'indice de réfraction est importante dans l'étude des corps bruts, car elle peut conduire à distinguer nettement ces corps les uns des autres, du moins lorsqu'ils sont purs de tout mélange mécanique qui pourrait déranger la marche des rayons, et qu'ils sont dans des états de cristallisation comparables.

L'indice de réfraction des minéraux varie entre des limites assez étendues. Si l'on prend pour unité l'indice de réfraction de l'eau, les indices de réfraction de la chaux fluatée, de la chaux sulfatée, du quartz (*Rayon ordinaire*), de la topaze blanche, de la chaux carbonatée (*Rayon ordinaire*), du saphir blanc, du grenat, du carbonate de plomb, du diamant (*Maximum*), du chromate de plomb (*Maximum*), sont respectivement 1,436, 1,525, 1,548, 1,610, 1,654, 1,768, 1,815, 2,084, 2,755, 2,974.

Les couleurs dont les substances minérales sont accidentellement pourvues apportent toujours quelques différences dans l'indice de réfraction. Généralement elles l'élèvent : le saphir blanc a pour indice de réfraction 1,768, le saphir bleu 1,794, le rubis oriental, qui est de même nature, 1,779 ; la topaze blanche a pour indice de réfraction 1,610, et la topaze jaune 1,632.

Il est probable que la loi même de la réfraction qui définit l'indice de réfraction comme la valeur du rapport constant des sinus des angles d'incidence et de réfraction n'existe plus, ou doive être modifiée, quand le minéral dont il s'agit absorbe plus ou moins complétement la lumière. Cet effet est facile à concevoir; car dans le cas d'absorption ou d'extinction partielle, l'action du minéral sur la lumière devient alors une action réellement perturbatrice. Dans ce cas, l'indice de réfraction n'aurait plus de signification précise.

Lorsqu'une même substance cristallise dans deux systèmes différents, l'indice de réfraction varie. L'indice de réfraction du calcaire cristallisé rhomboédrique est 1,654 pour le rayon ordinaire; l'indice correspondant de l'aragonite est égal à 1,693. La réfraction ne dépend donc pas seulement de la nature des substances, mais encore de l'arrangement de leurs particules.

Newton, dont les regards ont embrassé la nature entière, observa le premier la connexion qui existe entre les pouvoirs réfringents des milieux diaphanes et leurs propriétés chimiques. Sa conjecture bien connue sur la nature inflammable du diamant, fondée sur l'extrême réfringence de ce minéral, eût été cinquante ans plus tard, lorsque la chimie se fut constituée à l'état de science, une découverte étonnante de hardiesse; celle de la nature inflammable d'un des éléments de l'eau est non moins frappante, et intéresse peut-être davantage par la grande influence que sa vérification a eue sur la science chimique tout entière.

Il résulte de la constance de l'indice de réfraction que la déviation produite par un prisme réfringent change avec l'obliquité du rayon incident, et qu'il existe un *minimum* d'angle de déviation. Le calcul apprend que ce *minimum* a lieu lorsque les angles d'incidence et d'émergence sont égaux entre eux. La détermination de cette déviation minimum est du plus grand intérêt, parce qu'elle donne un moyen facile d'évaluer l'indice de réfraction. On trouve, en effet, que si l'on désigne par A l'angle du prisme, par Δ la déviation minimum, par *e* l'indice de réfraction, ou l'équivalent optique, on aura :

$$e = \frac{\sin A + \Delta)}{\sin \frac{1}{2} A}$$

Double réfraction.

La lumière, en traversant un grand nombre de substances cristallisées, se partage en deux rayons que nous avons désignés sous les noms de rayon ordinaire et rayon extraordinaire; et l'ensemble des observations qu'on a pu recueillir montre que les corps à réfraction simple ou sont privés de cristallisation, ou sont cristallisés dans le système cubique.

Les phénomènes de la double réfraction ne se manifestent pas indifféremment dans tous les sens. On reconnait, en faisant tailler convenablement les cristaux biréfringents, que pour les uns il y a une direction dans laquelle on ne voit qu'une seule image, tandis que dans les autres, on découvre deux directions semblables. Dans le spath d'Islande, par exemple, le phénomène de la double réfraction disparait dans la direction de l'axe de cristallisation; dans la topaze, on trouve une première direction sans double réfraction inclinée à la droite de l'axe, et une seconde direction inclinée à gauche. Ces directions sont ce qu'on nomme les lignes neutres, ou les axes de double réfraction, ou les axes optiques du cristal. Une ligne neutre ou un seul axe optique se confond toujours avec l'axe de cristallisation : la ligne moyenne, ou qui divise en deux parties l'angle de deux lignes neutres, correspond toujours à un des axes de cristallisation.

A M. Brewster appartient la gloire de cette belle et frappante généralisation, qui a établi pour toujours une liaison intime entre la cristallonomie et la photonomie; liaison riche en découvertes qu'elle a déjà fait naître, et plus riche encore par les découvertes qu'elle promet. Le savant physicien anglais formula, en 1817, la loi suivante : tous les cristaux à un axe optique appartiennent au système rhomboédrique ou au système prismatique à base carrée, c'est-à-dire que leur forme primitive est un rhomboèdre ou un prisme à six faces régulier. Tous les cristaux à deux axes optiques appartiennent à l'un des deux autres systèmes prismatiques, c'est-à-dire que les cristaux dont toutes les faces verticales ne sont pas ordonnées symétriquement autour d'une ligne unique, possèdent deux axes optiques de double réfraction : il existe dans l'intérieur de ces corps deux

directions suivant lesquelles un rayon lumineux peut les traverser sans subir de division.

Brewster déduisit cette loi de l'examen d'un très grand nombre de minéraux comprenant 23 espèces à un axe, et 81 à deux axes. Quelques uns présentèrent des exceptions apparentes, et soulevèrent des difficultés qu'un examen plus attentif a fait disparaître. Pour se rendre compte des anomalies, il ne faut pas oublier que la loi de Brewster ne s'étend qu'aux cristaux qui affectent toutes les couleurs également, et que dès lors qu'un cristal semble choisir certaines couleurs pour exercer son action, il est très probable qu'il échappe à la loi commune. L'absorption, le polychroïsme, etc., sont des causes certaines d'anomalie.

Les corps réguliers qui ont pour forme primitive un cube, le diamant, le fluate de chaux, etc., ne possèdent pas la double réfraction ; il en résulte que, quelles que soient celles de leurs faces par lesquelles on observe, l'on n'obtient jamais qu'une image des objets que l'on considère. On a cru qu'il existait des exceptions à cette loi générale, M. Biot a montré qu'elles n'étaient qu'apparentes ; il s'efforce en outre d'établir par le raisonnement suivant qu'elles n'existent pas. Les cristaux réguliers sont des polyèdres constitués similairement autour de trois axes rectangulaires, se coupant en un point également distant de toutes ses faces : or, un cristal homogène de cette nature, construit sans discontinuité avec des polyèdres générateurs soumis aux conditions précédentes, ne peut exercer la double réfraction moléculaire, soit à un axe, soit à deux axes. En effet, la triple symétrie de ces générateurs n'est que l'expression d'une symétrie pareille existant dans la structure interne du cristal, et manifestée jusque dans les accidents de sa configuration externe. Donc, si l'on suppose la double réfraction à un axe : cet axe unique étant donné, on pourra mener en chaque point du cristal deux autres droites au moins, autour desquelles il sera moléculairement construit de la même manière, et devra agir similairement sur les éléments lumineux : ainsi les conditions absolues de polarisation et de vitesse assignées à ces éléments par la nature du phénomène devront être réalisées à la fois autour de trois droites en chaque point du cristal, ce qui implique contradiction. Si l'on suppose la double réfraction relative à deux axes : quand ceux-ci seront donnés, on

pourra toujours assigner deux autres couples de droites au moins, autour desquelles le cristal sera constitué de la même manière, et devra agir similairement; de sorte que, dans ce cas encore, la multiplicité exigée par la triple symétrie exclura la possibilité de l'action unique. Il résulte évidemment de ce que nous venons de dire, que, si une substance qui cristallise dans le système cubique possède la double réfraction, cette anomalie doit nécessairement tenir à une cause particulière, à une irrégularité dans la disposition des cristaux élémentaires des parties constituantes, à une pression accidentellement exercée sur certaines faces du cristal, à une sorte de trempe, à l'imbibition ou interposition de molécules de nature différente entre les molécules primitives, etc., etc. M. Biot a fait une longue étude de ces anomalies, et les a groupées sous une apparence de théorie qu'il a désignée sous le nom de polarisation lamellaire, et que nous analyserons bientôt.

Dans les cristaux à un axe, l'image principale ou le rayon ordinaire suit les lois de la réfraction ordinaire, c'est-à-dire qu'il est avec la ligne directe dans un plan perpendiculaire à la surface refringente, et que la relation entre le sinus de l'angle d'incidence et de l'angle de réfraction est restée la même. L'observation indique au contraire que le second rayon ou le rayon extraordinaire se trouve successivement avec le rayon incident dans des plans différents et que la loi des sinus ne peut plus exister.

Guidé par des idées théoriques que nous avons déjà combattues, M. Maccullagh était arrivé à douter que dans le spath calcaire le rayon ordinaire suivît dans sa réfraction la loi des sinus. Une expérience décisive de M. Brewster a pleinement réfuté cette assertion. Dans un même morceau de spath d'Islande, M. Brewster tailla deux prismes, de telle sorte que le rayon se propageât dans l'un parallèlement, dans l'autre perpendiculairement à l'axe; il colla ces deux prismes sur une même plaque de verre, et, en usant les faces opposées, leur donna les mêmes angles de réfraction. Il dirigea ensuite sur les deux prismes, à travers une fente étroite, le rayon jaune homogène de Fraunhofer D provenant d'une lampe à alcool salé, et il regarda du même œil à travers les arêtes refringentes des deux prismes. Les deux images réfractées de la ligne D coïncidèrent parfaitement, et il fut ainsi démontré que, dans les

limites au moins des erreurs d'observation, les rayons ordinaires des deux prismes ont le même indice de réfraction.

Dans les cristaux à deux axes, au contraire, les deux rayons sont tous deux réfractés extraordinairement, ou en dehors de la loi de Snellius. Il existe cependant dans le cristal deux coupes ou deux plans dans lesquels le rayon réfracté suit la loi ordinaire, et ces deux coupes fournissent le moyen de déterminer ce qu'on peut appeler les indices de réfraction du cristal. — L'angle compris entre les axes optiques des cristaux constitue un caractère physique du premier ordre par sa connexion intime et immédiate avec la disposition des molécules ou la structure du cristal. Il varie aussi entre des limites très distantes : de 5° pour la strontiane carbonatée, il est de 17° 30′ pour le plomb carbonaté, de 27° 51′ pour la cymophane, de 37° 42′ pour la baryte sulfatée, de 40 à 50° pour la topaze du Brésil, de 60° pour la chaux sulfatée, de 84° 19′ pour l'épidote, de 90° pour le sulfate de fer. Les valeurs de ces angles sont des constantes et déterminent les espèces.

L'angle des axes optiques n'est cependant pas toujours facile à déterminer avec précision, parce que ces axes se trouvent rarement ensemble dans le champ de la vision, parce qu'ils peuvent plus rarement encore être aperçus au travers des faces naturelles ; il faut alors recourir à des sections artificielles et à des instruments particuliers que nous décrirons plus tard.

Il y a des substances à un axe dans lesquelles l'indice de réfraction ordinaire est plus grand que l'indice de réfraction extraordinaire, et d'autres où c'est précisément le contraire ; en d'autres termes, dans certains cristaux le rayon ordinaire est celui qui s'éloigne le plus de l'axe, comme s'il était repoussé par cet axe ; dans les autres, il se rapproche le plus de l'axe, comme s'il était alors attiré. M. Biot, qui a découvert cette différence, a pu dès lors diviser les cristaux doués de la double réfraction en deux classes : les cristaux à double réfraction *attractive*, et ceux à double réfraction *répulsive*. Plusieurs physiciens ont substitué à ces dénominations celles de *positive* et *négative*, qui sont plus rationnelles et plus indépendantes de tout système.

La double réfraction positive ou négative est inséparable du cristal dans lequel on l'a une fois reconnue, et devient par elle-même

une distinction importante. Pour reconnaître la présence de l'une ou de l'autre, il suffit de constater la position des images l'une par rapport à l'autre. On regardera donc à travers deux faces verticales du cristal dont on étudie les propriétés, un objet assez net, comme un paratonnerre ou le bord d'une cheminée se dessinant sur le ciel. Si l'image extraordinaire est à droite de l'image ordinaire, le minéral est positif; il est négatif dans le cas inverse. La netteté de l'image ordinaire la distingue suffisamment de l'image extraordinaire. Celle-ci est en outre presque constamment irisée comme les objets que l'on regarde à travers une lunette qui n'est point achromatique. Il est plus sûr cependant, pour constater cette distinction, de comparer, comme nous le dirons plus tard, le cristal proposé à une autre substance dont le mode d'action est connu ; au spath d'Islande, par exemple, qui est négatif, ou au cristal de roche, qui est positif.

Dans les cristaux à un seul axe de double réfraction, l'axe a la même position quelle que soit la couleur du faisceau lumineux : mais, dans les cristaux à deux axes, les axes optiques changent de position suivant la couleur de la lumière ; de sorte que l'angle des deux axes varie suivant la nature des rayons colorés. On doit cette découverte à M. Herschell, qui trouva que dans le tartrate de potasse et de soude, ou sel de La Rochelle, l'inclinaison des axes pour la lumière violette était de près de 56°, et pour la lumière rouge de 75°. Dans d'autres cristaux, tels que le nitre, l'inclinaison des axes pour les rayons violets est plus grande que pour les rayons rouges ; mais toujours la ligne qui joint les extrémités des axes correspondant aux divers rayons est une seule et même ligne droite. M. Brewster a trouvé, de son côté, que pour la lumière rouge la glaubérite avait deux axes inclinés de près de 5°, et un seul axe pour la lumière violette.

Quelques observations importantes sur les effets de la compression ont conduit M. Brewster à la recherche de la cause de la double réfraction. Cette propriété n'est pas inhérente aux molécules elles-mêmes : par exemple, les fragments de silex n'en jouissent pas dans leur état de séparation ; dans le tabaseheer, quelques opales, et la silice qui a été fondue, il n'y a pas la plus légère trace de double réfraction. Mais, quand les parties de la silice en solution se réunissent en raison de leur attraction mutuelle ou de leur polarité,

elles acquièrent immédiatement, au moment de leur réunion, la propriété de la double réfraction, et la conservent tant qu'elles restent dans le même état d'agrégation. On peut concevoir facilement ce qui se passe : il existe en dissolution ou en fusion un grand nombre de molécules élastiques qui sont retenues à distance par le fluide dans un des cas, et par la chaleur dans l'autre. Supposons que, par l'évaporation ou le refroidissement, deux molécules soient amenées au contact par les forces ou les polarités qui produisent un arrangement cristallin, et qu'elles adhèrent fortement, elles présenteront chacune un axe de double réfraction dans les directions des lignes qui joignent leurs centres, comme si elles étaient comprimées par une force extérieure ; il faut seulement remarquer que la compression s'exerce ici, non sur la masse entière, comme dans un parallélipipède de verre dont on comprime certaines faces, mais sur chaque molécule, de sorte que les phénomènes de double réfraction, qui, dans le premier cas, sont un phénomène d'ensemble, existant une seule fois dans la masse des corps transparents, sont, dans le second cas, des phénomènes vraiment moléculaires, et qui se reproduisent à chacun des points du cristal.

Il résulte du fait de la cristallisation et du clivage, que les molécules des cristaux ont plusieurs axes d'attraction ou lignes suivant lesquelles la cohésion est plus forte, et dans la direction desquelles elles adhèrent plus ou moins. Cette adhérence plus ou moins grande constitue l'élasticité du cristal, élasticité qui varie d'une direction à l'autre. Nous avons déjà défini les axes d'élasticité ; ce sont trois axes rectangulaires tels que si les molécules sont déplacées dans la direction de ces axes, les forces élastiques développées agissent en sens contraire des déplacements, et suivant les mêmes lignes droites, quelles que soient d'ailleurs les lois de l'action moléculaire. Dans les cristaux à un axe, l'ellipsoïde d'élasticité est un ellipsoïde de révolution ; deux des axes sont égaux et de même nom, tandis que le troisième coïncidant avec l'axe optique, peut être de même nom ou de nom différent. Dans les cristaux à deux axes optiques, les trois axes d'élasticité sont inégaux ; dans ceux qui n'ont pas deux axes optiques ou qui ne jouissent pas de la double réfraction, les axes d'élasticité sont égaux.

Quand les trois axes d'élasticité sont égaux, les trois compressions

rectangulaires produites par l'agrégation des molécules se neutralisent réciproquement; le corps donne dans ces trois directions des clivages également faciles, et ne doit pas avoir de double réfraction. En effet, jusqu'ici tous les cristaux qui se clivent également dans trois directions rectangulaires ne jouissent pas de la double réfraction.

Si les trois axes d'élasticité sont inégaux, les différences de densité qu'ils produisent donnent naissance à deux angles de double réfraction dont le plus fort sera négatif ou positif, suivant que la compression l'emportera ou non sur la dilatation. De fait, tous les cristaux appartenant au système prismatique et dans lesquels le clivage indique que les parties adhèrent avec une force inégale dans trois directions, ont toujours deux axes optiques inégaux dont le plus grand répond à une double réfraction négative ou positive.

Parmi les cristaux à un axe dont la forme primitive est le rhombe obtus, il y en a qui ont un axe de double réfraction négative, et seulement un ou deux qui ont un axe de double réfraction positive. La structure des premiers peut être produite par la compression provenant des attractions dans la direction de deux axes rectangulaires, qui dilatent les molécules dans la direction du troisième, et le rendent un axe de double réfraction négative, si la compression exercée dans sa direction ne contrebalance la dilatation correspondante aux deux autres axes. Mais si la compression produite dans le sens du troisième axe compense avec excès la dilatation résultante, le troisième axe sera un axe de double réfraction positive.

M. Brewster avait émis ces idées et fait ces rapprochements quand il eut connaissance du mémoire de M. Savart sur la structure des corps cristallisés déterminée par les vibrations sonores. L'illustre physicien français constata que les modes de vibrations présentées par les plaques vibrantes varient suivant qu'elles sont diversement taillées dans le cristal.

Une lame taillée perpendiculairement à l'axe d'un rhomboïde donne deux modes de lignes nodales composés chacun de deux lignes droites rectangulaires. Une lame taillée parallèlement aux faces produit aussi deux systèmes de lignes nodales, mais l'un rectangulaire et l'autre hyperbolique; le système rectangulaire donne alors le son le plus grave. Si l'on taille une lame sur un des angles

solides latéraux parallèlement aux faces d'un rhomboïde inverse du précédent, on obtient aussi deux systèmes nodaux, l'un rectangulaire, l'autre hyperbolique : mais d'un côté les sommets de l'hyperbole sont plus écartés que les précédents, et de l'autre le système rectangulaire donne le son le plus aigu. Si la lame taillée sur l'angle est parallèle à l'axe, il se présente encore dans les lignes nodales un système rectangulaire et un système oblique, mais le premier donne le son le plus élevé. Enfin, si l'on taille des lames sur les arêtes latérales, et parallèlement à l'axe, elles présentent deux systèmes de lignes nodales hyperboliques qui donnent des sons différents. Savart arriva encore à ce curieux résultat, que l'axe du spath calcaire, axe de double réfraction négative, est l'axe de moindre élasticité; tandis que l'axe du cristal de roche, axe de double réfraction positive, est l'axe de plus grande élasticité. Ce fait est une confirmation frappante des rapprochements faits par M. Brewster.

Pour qu'on n'étende pas outre mesure cette comparaison entre les phénomènes optiques et acoustiques, il convient d'observer que, dans ce qui précède, le terme *élasticité* a deux significations tout-à-fait distinctes; car les phénomènes acoustiques dépendent de l'élasticité des parties du solide, tandis que les phénomènes optiques dépendent de l'élasticité de l'éther. Ces deux élasticités ont un certain rapport; Savart cependant a trouvé que quelques modifications acoustiques de l'élasticité correspondent à des modifications optiques, tandis que d'autres suivent une tout autre loi de symétrie.

Polarisation.

L'angle de polarisation complète d'un rayon réfléchi à la surface d'un milieu, offre un caractère minéralogique d'une grande importance en lui-même : d'abord parce qu'il varie d'une substance à l'autre, et, en second lieu, parce qu'il donne sur-le-champ une valeur approchée de l'indice de réfraction suffisante, dans beaucoup de cas, pour distinguer deux substances, susceptibles autrement d'être confondues.

De 35° 25′ pour le verre, l'angle de polarisation est de 33° 2′ pour le quartz; de 31° 9′ pour la chaux carbonatée; de 26° 15′ pour le soufre; de 21° 57′ pour le plomb carbonaté.

M. Brewster a trouvé cette loi générale, que la tangente de l'angle de polarisation est égale à l'indice de la réfraction. Cet angle, d'ailleurs, se détermine avec facilité, dès que l'on a une surface assez polie pour donner une réfraction régulière, et l'on peut se servir pour ce sujet de tous les instruments propres à mesurer l'angle d'inclinaison d'un rayon sur un plan. On évalue sans peine l'angle de polarisation de fragments très petits de pierres montées en bijoux, d'échantillons trop précieux pour qu'on puisse les tailler en prismes, de corps opaques même, tandis que dans ces divers cas la mesure directe de l'indice de réfraction serait impraticable.

La remarque suivante n'a pas échappé à la sagacité du docteur Brewster: c'est que l'angle de polarisation, à la surface des milieux cristallisés, n'est pas le même dans tous les plans d'incidence, et que la déviation, quoique excessivement faible quand il s'agit de la réflexion ordinaire, devient très sensible, et quelquefois énorme, lorsque le pouvoir réfléchisseur est affaibli par l'action d'un enduit qui recouvre la surface du milieu, de manière à ne laisser arriver à l'œil que les rayons qui ont pénétré jusqu'à une certaine profondeur, et subi en partie l'action du cristal, si l'enduit est doué d'un pouvoir réfringent approchant de celui du milieu.

Il résulte des expériences de M. Airy que le diamant, au lieu de polariser complétement la lumière réfléchie sous un certain angle, comme on le trouve pour les autres substances transparentes, présente à l'incidence sous laquelle la lumière est à peu près polarisée, des phénomènes qui ressemblent plus à ceux qu'on observe à la surface des métaux, c'est-à-dire que le diamant, ainsi que certaines substances très réfringentes, et les métaux, communiquent au rayon la polarisation circulaire ou elliptique.

La lumière polarisée ne donne qu'une seule image en passant à travers un prisme biréfringent, quand la section principale de ce prisme est parallèle ou perpendiculaire au plan de réflexion, tandis qu'elle donne deux images plus ou moins intenses dans toutes les autres positions.

Tout rayon de lumière qui a subi la double réfraction est polarisé. Si on place un rhomboèdre de spath d'Islande sur une feuille de papier sur laquelle on aura tracé un point noir, on obtiendra deux images, dont l'une subit la réfraction ordinaire, et l'autre la

réfraction extraordinaire. Si, sur ce premier rhomboèdre, on en place un second, les deux rayons réfractés les pénètrent; mais suivant la position des deux rhomboèdres, on observe deux ou quatre images. Si les deux rhomboèdres sont placés exactement dans la même position relative, c'est-à-dire si toutes leurs faces, et par conséquent leurs sections principales, sont parallèles, on ne voit que deux images. Le contact n'est pas nécessaire; les deux rhomboèdres peuvent être placés à une certaine distance, pourvu que le parallélisme existe. Alors le rayon qui provient de la réfraction ordinaire du premier cristal se réfracte ordinairement dans le second, et de même, celui qui provient de la réfraction extraordinaire du premier cristal se réfracte dans le second extraordinairement.

Si, maintenant, l'un des rhomboèdres étant fixe, on donne à l'autre un mouvement de rotation, de manière que les faces qui reçoivent les images restent parallèles, on voit, aussitôt que les sections principales ne sont plus parallèles, apparaître quatre images. Chacun des rayons émergents du premier cristal se divise en deux en traversant le second : de là résultent les quatre images, deux ordinaires, deux extraordinaires, dont les intensités varient avec la position du second cristal, et dépendent par conséquent de l'angle compris entre les sections principales. Bientôt après avoir vu les images s'écarter, on les voit se rapprocher, et lorsque les sections principales sont devenues perpendiculaires, elles se réunissent de nouveau, et l'on n'aperçoit plus que deux images. Mais leurs rôles sont pour ainsi dire changés : l'image qui provient de la réfraction ordinaire du premier cristal est réfractée extraordinairement par le second; et réciproquement, l'image extraordinaire du premier cristal est réfractée ordinairement par le second.

En continuant le mouvement, la séparation des images s'opère de nouveau; les quatre images reparaissent jusqu'à ce que le second rhomboèdre devienne parallèle au premier.

La lumière polarisée par une glace ou par réflexion aurait produit précisément le même effet, si elle avait été reçue sur un rhomboèdre de spath: seulement, dans ce cas, il n'y aurait eu qu'une ou deux images, suivant la position de la section principale du rhomboèdre par rapport au rayon polarisé.

La comparaison de ces deux expériences conduit à cette conclu-

sion, qu'il existe dans le spath d'Islande deux plans de polarisation perpendiculaires l'un sur l'autre, et qui correspondent aux plans diagonaux du rhomboèdre. La même chose a lieu dans tous les cristaux à un axe.

Nous avons dit que la lumière polarisée, en tombant sur une plaque de tourmaline dont l'axe est parallèle au plan de réflexion, s'éteint complétement, ou du moins en très grande partie ; elle se transmet, au contraire, avec une intensité croissante, à mesure que l'axe de la tourmaline approche d'être perpendiculaire au plan de réflexion.

Dès lors, pour déterminer le plan de polarisation d'un rayon, il suffit de le recevoir sur une plaque de tourmaline : quand il s'éteint complétement, le plan de polarisation est parallèle à la plaque ; lorsqu'il a son maximum d'intensité, son plan de polarisation est parallèle à l'axe de la plaque.

Lorsqu'on prend deux plaques de tourmaline taillées parallèlement à l'axe, et qu'on les place l'une sur l'autre dans leur position naturelle, les plaques laissent passer la lumière ; si l'on tourne une des plaques, la lumière qui a traversé la première, et qui est polarisée, est en partie éteinte : l'espace compris entre les deux tourmalines devient de plus en plus obscur ; il l'est entièrement quand les deux plaques douées de polarisation complète sont à angle droit.

Si maintenant on interpose entre les deux plaques de tourmaline un cristal jouissant de la double réfraction, le rayon polarisé par la première tourmaline sera dévié de sa route par le cristal ; son plan de polarisation aura tourné, et ce rayon n'étant plus perpendiculaire à la surface d'émergence, il ne sera plus dans une position convenable pour être éteint ; la lumière sera donc rétablie, et la partie qui était obscure redeviendra transparente.

Cette expérience simple suffit pour distinguer les minéraux possédant la double réfraction de ceux qui ne la possèdent pas, et, par suite, pour déterminer, même sans l'étude des formes, les substances cristallisant dans le système régulier, les seules qui ne soient pas biréfringentes.

Le mémoire très curieux de M. Haidinger, sur un moyen de reconnaitre la lumière polarisée et la position du plan de polarisation, donnera un nouvel intérêt aux considérations précédentes, et com-

blera une lacune existant jusqu'ici dans la science : les observations du physicien allemand causeront, si elles se confirment, une agréable surprise.

La découverte de la polarisation de la lumière par Malus fut bientôt suivie par un si grand nombre de découvertes brillantes dans cette branche des connaissances humaines ; la sagacité d'Airy, de Brewster, de Biot, d'Arago, de Fresnel, de Herschell, de Seebeck et d'autres, nous ont fait connaitre sur ce sujet tant de choses remarquables que nous pouvons regarder comme épuisé ce champ riche autrefois d'abondantes moissons. Il reste cependant encore à glaner çà et là quelques épis, et l'on ne verra pas sans intérêt que je suis parvenu à reconnaître la lumière polarisée d'une manière directe, avec l'œil nu, sans aucun instrument, sans l'aide d'un appareil quelconque ; et même à déterminer d'une manière non douteuse la direction dans laquelle a lieu la polarisation.

» En observant avec attention des plaques d'andalousite taillées parallèlement à l'axe, j'avais reconnu depuis longtemps que leur couleur paraissait en général d'un rouge très pâle, car elles étaient taillées si minces, que la lumière rouge n'était pas absorbée en entier ; mais je remarquai aussi qu'on voyait quelquefois comme un fantôme fugace d'une couleur jaunâtre, qui disparaissait lorsqu'on fixait la plaque d'un regard plus ferme. Taillée perpendiculairement aux axes optiques, l'andalousite, lorsqu'on dirige son regard suivant les axes, présente, dans des directions qui dépendent de la structure cristalline, de belles aigrettes lumineuses d'un vert pâle environnées de deux espaces d'un rouge foncé. Je ne pus trouver une figure déterminée à la couleur jaune, ni en la regardant directement, ni au moyen d'une loupe.

» Plus tard, en regardant à travers un spath d'Islande un carré noir sur un fond blanc, je cherchais à reconnaître une différence d'intensité entre les deux images, et comme elle était presque insensible, il était nécessaire, pour comparer, de fixer alternativement l'une et l'autre image : il se montra bientôt des teintes jaunâtres et gris-verdâtres qui devinrent de plus en plus tranchées comme couleurs complémentaires, jusqu'à ce qu'elles se dessinèrent distinctement sous la forme d'aigrettes lumineuses jaunes sur un

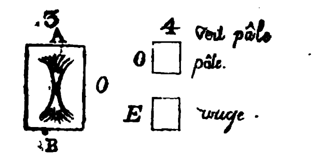
1 O E

fond violet disposées comme les montre la fig. 1. L'image ordinaire, supérieure O, présente une aigrette horizontale : l'image extraordinaire, inférieure, une aigrette verticale. les aigrettes, minces au milieu, divergent des deux côtés. Le noir marque l'absence de la lumière. Les deux images blanches d'une ouverture découpée dans du papier noir et vue à travers un spath d'Islande, ou les deux images de la loupe dite dichroscopique, en les présentant à une lumière très claire et uniforme,

2 O E

offraient aisément le phénomème représenté fig. 2. L'aigrette jaune du rayon ordinaire O est verticale, celle du rayon extraordinaire E est horizontale; l'axe du rhomboèdre était placé dans un plan vertical : or, le rayon ordinaire est polarisé dans le plan de la section principale du rhomboèdre; le rayon extraordinaire dans un plan perpendiculaire : donc *la direction des aigrettes lumineuses marque exactement la position du plan de polarisation.*

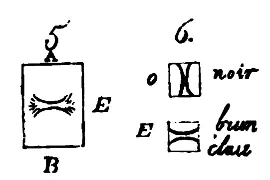
» Il fallait donc reprendre l'examen des plaques d'andalousite, en les plaçant, non plus à distance de la vision distincte, mais tout près devant l'œil pour regarder une lumière claire à travers elles. Les aigrettes se montraient maintenant, quelle que fût la direction du regard, mais elles restaient toujours parallèles à l'axe vertical. *De cette position des aigrettes*, comparée avec la fig. 2, *il résulte que, dans*



l'andalousite, le rayon vert clair qui n'est pas absorbé est le rayon ordinaire. Et, en effet, dans la loupe dichroscopique, l'image supérieure O reste vert clair, l'inférieure E devient rouge foncé. La position verticale des aigrettes s'observe sur les faces ∞ A, sur $\infty \bar{D}$ et $\infty \bar{D}$, sur le prisme de 90° 51′ et sur ses deux diagonales. On l'observe même dans des galets qui n'ont été ni taillés ni polis, et qu'on place très près devant l'œil. L'observation se fait d'une manière très nette en amenant peu à peu à la position horizontale le cristal qu'on a d'abord tenu verticalement; car la rétine devient ainsi, par la couleur

complémentaire, plus sensible à l'impression. Il n'est pas toujours possible de faire ainsi tourner le plan de polarisation autour de la ligne visuelle comme axe. Si la lumière polarisée est immobile, on incline alternativement la tête à gauche et à droite, et alors on observe aussitôt, d'une manière distincte, les aigrettes, bien que dans une direction déviée.

» L'examen d'une plaque de tourmaline se présentait naturellement tout de suite après, fig. 5 et 6. Elle laissait voir des aigrettes lumi-



neuses très distinctes dans une position horizontale par rapport à l'axe vertical AB. *Le rayon de lumière qui la traverse*, comparé avec la fig. 2, *est, d'après cette position de l'aigrette, le rayon extraordinaire*. Et, en effet, dans la loupe dichroscopique l'image ordinaire O est noire, toute la lumière du rayon ordinaire étant absorbée, et l'image extraordinaire E paraît colorée en brun clair.

» En comparant l'andalousite, fig. 3, qui ne laisse passer que le rayon ordinaire, et la tourmaline, fig. 5, qui absorbe ce rayon, il résulte que, superposées, elles ne laisseront passer que le minimum de lumière correspondant à leur épaisseur : placées en croix, elles donnent le maximum. Dans l'andalousite, c'est le rayon ordinaire qui est le plus clair et le plus intense ; dans la tourmaline, c'est l'extraordinaire.

» Les tourmalines vertes laissent voir aussi nettement l'aigrette jaune ; il n'y a que les tourmalines rose pâle, à peine colorées, de l'île d'Elbe, qui laissent passer les deux rayons. Dans la loupe dichroscopique, l'image ordinaire paraît seulement un peu plus colorée.

» Il était intéressant d'examiner aussi la lumière polarisée par les méthodes ordinaires. On apercevait toujours plus ou moins distinctement les aigrettes jaunes avec les espaces bleuâtres qui les accompagnent.

» Un miroir noir placé sous l'œil dans une position horizontale,

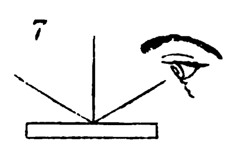


fig. 7, la large surface d'une table bien polie et d'une couleur uniforme, le parquet même luisant frotté de cire, font voir une aigrette verticale, c'est-à-dire placée dans la section principale polarisante. Sur des panneaux de vitres verticaux, les aigrettes presque horizontales, inclinées seulement un peu dans le plan de polarisation, s'observent très facilement, surtout si l'on place alternativement l'œil dans l'image réfléchie d'une traverse de fenêtre rapprochée et horizontale, ou d'une croix; car la rétine devient ainsi plus sensible à l'impression produite.

» La lumière qui a traversé obliquement une pile de glaces, ou même une seule glace, mais la première plus distinctement, comme on devait s'y attendre, laissent voir les aigrettes jaunes *perpendiculaires au plan d'incidence des rayons*.

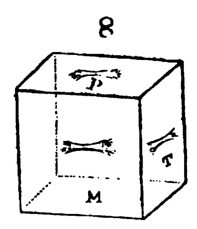
» Le ciel bleu est distinctement polarisé dans des sections principales passant comme grands cercles par le soleil. L'atmosphère, quant à ses effets optiques, peut être considérée comme un cristal à un seul axe ayant, dans une direction, la couleur de la lumière du soleil qui l'éclaire, et, dans une direction perpendiculaire, la couleur des immenses profondeurs de l'espace, l'absence de toute lumière, le noir modifié en bleu plus ou moins foncé par la matière de l'atmosphère éclairée. Si l'on regarde rapidement en quelque endroit le ciel bleu, on aperçoit distinctement, dans la direction de la section principale, l'aigrette jaune qui se présente presque comme deux taches d'un jaune tendre, unies et nébuleuses, et d'un diamètre apparent d'à peu près deux degrés. On rend sans peine l'impression plus intense en fermant rapidement les yeux après l'avoir reçue, et en les ouvrant à égale hauteur vers un grand cercle passant par le soleil et perpendiculaire sur le premier. La seconde aigrette apparait sur la rétine en croix avec la première et beaucoup plus distincte. La succession alternative des deux impressions donne

toute son évidence à ce curieux phénomène, qu'on observe à l'œil nu sans aucun appareil.

» Plus la lumière est polarisée, et plus on est sûr de l'apparition des aigrettes. Elles se montrent de la manière la plus distincte dans les cristaux qui absorbent l'un des deux rayons, et qui sont ordinairement colorés. Déjà, dans le spath d'Islande complétement transparent, le rayon ordinaire est un peu plus absorbé que l'extraordinaire. Si, dans des morceaux assez épais, on regarde obliquement à travers deux faces parallèles, de sorte qu'on dirige le regard presque perpendiculairement à l'axe du rhomboèdre, on aperçoit l'aigrette jaune dans une position *perpendiculaire* à l'axe, c'est-à-dire qu'on voit l'excédant, le rayon le plus intense, le rayon extraordinaire. Les aigrettes jaunes se montrent d'une manière bien plus distincte dans un spath calcaire jaune de miel de St-Denis. Ce spath calcaire se présente déjà à l'œil nu jaune de miel rougeâtre dans la direction de l'axe, et d'une couleur plus jaune dans une direction perpendiculaire. Si, avec la loupe dichroscopique, on sépare les deux rayons en dirigeant le regard perpendiculairement à l'axe, O est d'un jaune de miel rougeâtre et E jaune-vineux pâle et beaucoup plus clair que O.

» La cordiérite, vue à la lumière ordinaire, présente trois couleurs dans des directions perpendiculaires. Dans la fig. 8, qui représente

8



un cube taillé du cabinet minéralogique impérial, ayant deux lignes de côté, P est d'un beau bleu, M d'un gris jaunâtre clair, T d'un gris faiblement bleuâtre, un peu terne. La couleur totale est celle de la variété claire.

» Par le dichroscope, les couleurs sont séparées :

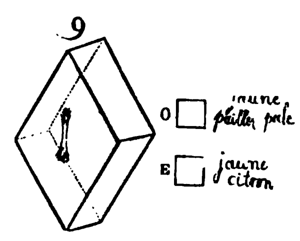
P en bleu foncé et bleu très pâle,

M en bleu foncé et gris jaunâtre,

T en gris jaunâtre et bleu très pâle.

» Les aigrettes sont disposées comme l'indique la figure ; elles indiquent la clarté des couleurs. La teinte la plus intense et la plus claire est le gris jaunâtre ; la plus faible et la plus foncée est le bleu foncé, lequel est absorbé le premier. La couleur bleue de P ne contient pas de mélange de jaune ; les aigrettes paraissent d'un violet franc, mais faible.

» Dans le sulfate de baryte, cette espèce minérale si remarquable qui mériterait les honneurs d'une monographie rien que par ses couleurs, les aigrettes ne sont pas disposées de la même manière dans toutes les variétés. Les cristaux jaunes de Felsobanya présentent l'aigrette comme fig. 9, dans la grande diagonale du rhombe :

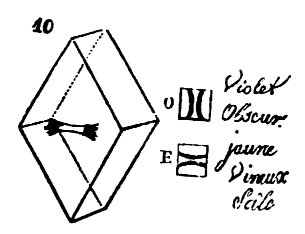


aussi l'image supérieure ordinaire O est-elle jaune de paille pâle, plus claire que l'image inférieure extraordinaire E, qui est jaune-citron. Dans un échantillon de Beira, en Portugal, qui se trouve dans le cabinet minéralogique impérial, et qui est brun d'œillet pâle, les aigrettes sont placées dans la petite diagonale du rhombe : aussi l'image supérieure O est-elle d'un bleu violet foncé, et l'image inférieure E d'un jaune vineux pâle ; cette dernière est partant plus claire, et l'effet de lumière qui répond à cette couleur subsiste, tandis que la couleur foncée bleu violet est absorbée.

» Des feuilles de mica assez épaisses pour que l'un des rayons paraisse sensiblement plus clair que l'autre, plus fortement absorbé, présentent dans la lumière ordinaire les aigrettes dans un plan qui passe par la ligne médiane et est perpendiculaire au plan des axes. Plus les feuilles sont minces, plus aussi est faible la différence d'intensité des deux rayons polarisés dans des plans perpendiculaires : aussi on ne découvre plus alors d'aigrettes dans la lumière ordinaire ; mais elles apparaissent d'autant plus belles et plus vives, si l'on regarde à travers des feuilles minces de mica, ou en général d'un

cristal biréfringent, une surface qui polarise la lumière, et elles présentent ici une modification intéressante.

»Si on regarde à travers un appareil analyseur polarisant la lumière dans une direction déterminée, une surface horizontale qui polarise la lumière, l'aigrette lumineuse verticale de celle-ci ne change pas la position de l'aigrette dans l'analyseur. Si les deux aigrettes sont parallèles, ce qui a lieu quand elles sont verticales toutes les deux, l'œil reçoit le maximum de lumière; il reçoit le minimum lorsque l'aigrette de l'analyseur est horizontale, puisque le rayon polarisé dans un plan vertical a été absorbé par la surface qui ne réfléchit ou ne transmet qu'un rayon polarisé dans un plan horizontal. Le maximum de l'absorption a lieu lorsqu'on a tourné l'analyseur



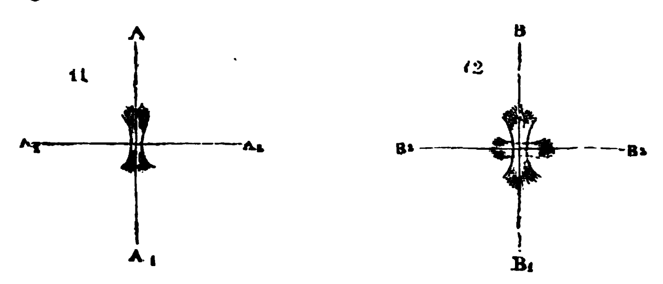
de 90°. En continuant de tourner, on trouve un minimum à 180°, un second minimum à 270°, et on revient à 360° ou à 0° au minimum primitif d'absorption.

» Il en est autrement lorsqu'on emploie dans cette recherche une lamelle qui transmet deux rayons polarisés dans deux plans perpendiculaires et d'une intensité à peu près égale, ce qui est toujours le cas pour les feuilles de cristaux, sauf dans la direction des axes.

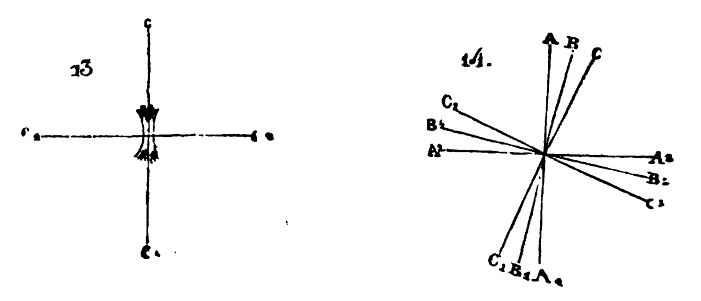
» Il faut ici distinguer trois positions différentes des aigrettes jaunes.

» 1° La position verticale dans la ligne AA_1, fig. 11, qui reste fixe comme le plan horizontal de polarisation; 2° les deux aigrettes polarisées BB_1, $B_2 B_2$, fig. 12, qui subsistent dans des directions perpendiculaires pour chacune des deux polarisations, lorsqu'on détruit l'une d'elles par un appareil convenable; 3° l'aigrette CC_1, fig. 13, qui, en recouvrant A par B, s'observe dans des azimuths différents.

» Lorsqu'on pose la plaque BB_1 sur AA_1, il apparait une aigrette CC_1 également verticale.



» Si l'on fait tourner BB_1, fig. 14, en portant la partie supérieure vers la droite d'un angle φ, l'aigrette jaune apparait dans la direction CC_1 qui fait avec la ligne AA_1 un angle 2φ.



» La distance angulaire du plan de polarisation actuel et du plan immobile est double de la distance du plan de polarisation primitif de l'un des rayons dans la feuille. Elle est en avant d'un angle égale à l'angle de torsion φ.

» Si l'on tourne la feuille de cristal de 45°, CC_1 prend une position horizontale. La déviation du plan de polarisation est alors un maximum, en sorte qu'en l'examinant par un appareil dont le plan de polarisation reste immobile, on trouve les phénomènes d'absorption opposés qui répondent à une position AA_1, bien que la feuille n'ait été tournée que de 45°.

» En faisant tourner BB_1 de 90°, l'aigrette jaune prend la position A_1A, c'est-à-dire qu'elle est verticale, mais qu'elle a son extrémité supérieure tournée vers le bas. Les phénomènes d'absorption sont les mêmes que dans la position primitive.

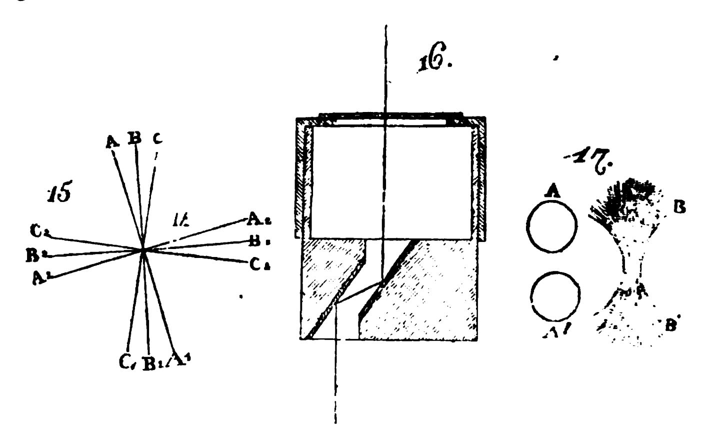
» En faisant tourner de 180°, l'aigrette jaune reparaît de nouveau dans la direction AA_1. L'aigrette a achevé sa rotation complète, bien que la feuille de cristal n'ait encore décrit qu'un demi-cercle. Lorsqu'elle a décrit 360°, les aigrettes qui apparaissent à l'œil ont déjà parcouru deux circonférences entières.

» La clarté et l'obscurité des plaques de cristal, qui varient dans chaque octant pour la lumière polarisée et analysée, sont dans une liaison immédiate avec l'apparition des aigrettes. À partir de la ligne qu'elles déterminent, l'effet opposé à la polarisation va en croissant et devient un maximum dans une position perpendiculaire à cette ligne. Là se trouve le second plan de polarisation perpendiculaire au premier. Si l'une ou l'autre ligne couvre l'aigrette de la polarisation primitive du miroir, l'aigrette qui apparaît devient nécessairement verticale. Donc, le véritable maximum de l'effet opposé tombe au milieu entre les deux positions, et revient ainsi quatre fois, savoir, à 45°, 135°, 225° et 315°. Lorsque l'aigrette polarisée et l'aigrette de l'analyseur sont parallèles, ces espaces sont clairs, et les espaces intermédiaires 0°, 90°, 180°, 270° obscurs. L'inverse a lieu lorsque les faisceaux sont croisés.

» Au moyen des aigrettes lumineuses jaunes que l'on découvre à travers des feuilles de mica sur des surfaces polarisantes, il est facile de soumettre ces dernières à une observation directe. On n'a qu'à regarder à travers le mica pendant un temps court, et à l'écarter ensuite rapidement de l'œil ; la rétine reste ainsi plus sensible pour l'impression d'une aigrette semblable qui se fait immédiatement après dans une autre direction. Cette seconde impression n'est pas seulement une sensation complémentaire, car les aigrettes se montrent sur la surface polarisante dans une direction déterminée, quelle qu'ait été la position de celles qu'on a vues à travers le mica.

» Les phénomènes des aigrettes placées à une distance angulaire double lorsqu'on fait tourner la feuille de mica, telles qu'elles ont été décrites plus haut, peuvent encore être comparées d'une autre manière. Qu'on fixe la position de la feuille de mica, en partant de BB_1, fig. 15. Si l'on fait tourner le plan primitif de polarisation AA_1 à partir de B vers la gauche, l'aigrette paraît sous le même angle à droite dans la direction CC_1. C'est une véritable polarisation circu-

laire, ou, pour mieux dire, gyroïdique. L'angle BMC est toujours égal à l'angle BMA. C est placé à droite de B, si A est placé



a gauche; par contre, C se trouve à gauche de B, quand on fait tourner A à droite.

» De pareilles observations ne peuvent se faire avec les instruments ordinaires, dans lesquels le miroir polarisant est fixe. On les fait au contraire très aisément avec ceux qui sont disposés comme fig. 16. Les rayons déviés par la polarisation y sont ramenés dans l'axe des instruments par des miroirs métalliques parallèles.

» Ce n'est que dans la direction des axes que les aigrettes se montrent encore dans une position fixe.

» Mais que sont donc enfin les aigrettes jaunes qui ont été observées dans toute lumière polarisée? Rappelons ici, d'après Herschell, es phénomènes que présente la corde tendue qui a été d'abord proposée par le docteur Young comme analogie destinée à expliquer le mouvement ondulatoire des particules de l'éther ébranlées par la lumière. Lorsqu'on regarde cette corde dans la direction dans laquelle elle est tendue, les impressions des ondes qui se font dans le plan d'oscillation des deux côtés de la section transversale, doivent être les plus distinctes dans leur plus grand écart, AA', fig. 17, parce que là elles s'arrêtent un instant, pour revenir, comme on le remarque si bien dans les cordes vibrantes. Les aigrettes jaunes BB' ont une forme qui est très bien d'accord avec cette analogie. *L'œil voit dans la lumière polarisée les vibrations des particules de*

l'éther, si une pareille expression n'est pas trop hasardée : aussi leur apparition fixe ainsi d'une manière non douteuse le plan dans lequel se font les vibrations des ondes. Mais d'après cela, dans un rayon polarisé par réflexion, les vibrations ne sont pas, comme on l'admet pour base du calcul, parallèles à la surface du miroir polarisant, mais elles se font dans une direction qui lui est perpendiculaire. Le plan d'oscillation d'un rayon polarisé par une plaque de tourmaline n'est pas parallèle à l'axe cristallographique principal, mais lui est perpendiculaire.

» J'aurais bien désiré de soumettre déjà ici à un examen plus approfondi cette contradiction apparente, et en général de poursuivre les conséquences que peut avoir pour la lumière polarisée l'observation des aigrettes, surtout en ce qui concerne la polarisation circulaire ; mais ce sujet est trop vaste pour que je ne doive pas dès ce moment inviter ceux qui s'occupent d'optique de rechercher ce phénomène curieux et de le comprendre dans le cercle de leurs études. »

Terminons par la note suivante de M. Merz, de Munich, sur la polarisation par un simple cube de verre.

« En tenant obliquement devant l'œil un parallélipipède de verre rusquement refroidi, de manière à recevoir la lumière des nuages réfléchis sur la surface supérieure, on aperçoit plus ou moins distinctement une variété de couleurs qui ne peut provenir que d'un effet de polarisation dans l'intérieur de verre. Ce phénomène a quelque ressemblance avec un autre que voici : si l'on détourne de l'œil la base d'un prisme à angle réfringent assez aigu et qu'on en regarde obliquement la face supérieure, on voit les couleurs prismatiques des objets réfléchis dans une position renversée beaucoup plus vives qu'à travers le prisme. C'est que les rayons ont été ici deux fois réfractés, tous ceux au moins qui ont été réfléchis par la surface inférieure du prisme, et ils ont subi une plus forte dispersion, agrandie en outre par la plus grande obliquité de l'angle d'incidence. C'est ainsi que les rayons partis d'un nuage sont réfractés à la surface supérieure du parallélipipède mentionné, réfléchis sur la surface inférieure, puis réfractés une seconde fois à leur sortie par la surface supérieure. Mais ces réflexions et réfractions sont faibles, parce que d'abord elles ont lieu sur des surfaces parallèles, et que,

ensuite, l'angle d'incidence ne doit pas être trop grand, afin d'éviter une réflexion totale, telle qu'elle a lieu dans le prisme qui, lorsque l'angle réfringent dépasse une certaine grandeur, ne fait plus voir les couleurs réfléchies. En même temps les rayons ont subi dans l'intérieur du verre refroidi une modification telle qu'ils ne présentent plus les couleurs prismatiques dans leur ordre ordinaire et régulier, mais tordues selon la tension du verre, et comme nous le voyons aussi dans la polarisation ordinaire par des verres refroidis. Une telle polarisation s'observe de la manière la plus distincte et sans appareil de polarisation dans un cube de verre poli sur ses six faces, et brusquement refroidi. Si, dans une position convenable, on y regarde d'en haut, on aperçoit, surtout à partir des arêtes et des angles, une belle variété de couleurs présentant des figures déterminées. C'est qu'ici l'effet est produit non seulement par les réflexions et les réfractions sur la surface supérieure et sur l'inférieure, mais aussi par celles qui se font sur les faces latérales : aussi, dans une position bien choisie, on n'aperçoit pas seulement la polarisation à la surface du verre, mais aussi celle qui se fait dans l'intérieur. J'ai encore examiné ce cube de verre avec un polariscope, et, au risque même de répéter des choses déjà connues, je ferai ici quelques observations, parce qu'elles pourront porter sur certaines circonstances auxquelles jusqu'ici on a fait peu d'attention. Le cube ne présente pas les mêmes phénomènes dans les directions des trois axes. Si les arcs hyperboliques qui, lorsque les arêtes sont perpendiculaires aux rayons incidents, se perdent dans le blanc près des angles, et dans le sombre au milieu des arêtes, quand la position du cube est inclinée, présentent le rouge comme la couleur dominante dans leur milieu, ce sera dans la seconde direction des axes la couleur verte, et dans la troisième une couleur foncée bleue assez indécise. En tournant le cube autour de l'une de ses arêtes, ces couleurs passent peu à peu l'une à l'autre. Il en est comme si les deux miroirs supérieurs de l'instrument étaient tantôt perpendiculaires, tantôt parallèles au miroir polarisant, et que le cube laissât paraître le rouge, le vert, des couleurs de transition dans les positions intermédiaires, ou bien aucune couleur de préférence à une autre, lorsqu'il est dirigé suivant l'un de ses axes suivant lequel il parait que la tension a été la plus faible. Si, au lieu d'observer avec un

miroir, on emploie un cristal d'Islande, on voit, en le faisant tourner, l'image ordinaire alterner avec l'extraordinaire, et dans tous les cas si l'une se présente en vert, c'est en rouge qu'on voit l'autre, et réciproquement. C'est un fait curieux qu'une feuille de mica qui présente du rouge dans la position parallèle de l'instrument, et du vert dans la position perpendiculaire, ne change notablement ni le rouge ni le vert du tube, mais transforme dans le premier cas le bleu en vert, et, dans le deuxième, en rouge. J'ai aussi superposé quelques cubes semblables, mais les phénomènes n'en ont été que plus compliqués et moins nets. C'est pourquoi je préfère placer ici ce que j'ai observé sur plusieurs parallélipipèdes minces. Un seul, lorsque ses arêtes sont obliques aux rayons, présente ordinairement sous le polariscope, lorsque les miroirs sont parallèles, une tache bleue bordée de brun. Dans une position perpendiculaire, cette tache est jaune et bordée de blanc. Si, au premier parallélipipède, on en superpose un deuxième, la tache bleue se change en rouge, et la bordure brune en bleu; la tache jaune se change en bleu et la bordure blanche en rouge. Avec trois parallélipipèdes, on voit d'une manière plus distincte toutes les sept courbures prismatiques : seulement, dans le deuxième cas, leur ordre est renversé. En multipliant davantage les verres, le phénomène devient plus compliqué. Ces observations ne sont pas les mêmes pour tous les verres, parce que le refroidissement ne se fait pas pour tous d'une même manière. En comparant une pile de verres minces avec un seul cube dont l'épaisseur égale celle de la pile, je trouvai dans plusieurs cas la polarisation moins nette et moins intense dans la pile, probablement parce qu'il se perd beaucoup de lumière par la réflexion sur les surfaces de séparation. L'augmentation de la polarisation avec l'épaisseur et le nombre des verres est en opposition avec la polarisation colorée des lames minces; mais les conditions sont aussi différentes dans les deux cas. Je ferai encore observer que la meilleure manière de préparer le cube, qui est par lui seul un appareil de polarisation, parce qu'il renferme les miroirs nécessaires, consiste à donner d'abord au verre la forme d'un cube, à le chauffer au feu jusqu'à le ramollir, à l'exposer ensuite à un courant d'air en le plaçant sur un morceau de bois pour qu'il ne se fende pas, et enfin à le tailler et à le polir. »

Polarisation chromatique.

C'est sans contredit le caractère le plus varié que l'optique fournisse à la minéralogie.

Si l'on place entre deux tourmalines croisées à angle droit une plaque mince de sulfate de chaux de 1,259 millim. à 0,421, la surface paraîtra revêtue des couleurs les plus brillantes. Si son épaisseur est partout la même, sa teinte sera parfaitement uniforme; mais si elle a différentes épaisseurs, chaque épaisseur présente une couleur différente. Si l'on fait tourner la lame, les couleurs deviennent plus ou moins brillantes sans changer de nature, et l'on trouve que dans deux positions les couleurs disparaissent. Si en laissant la plaque mince immobile, dans la position où la couleur est plus brillante, on fait tourner la seconde tourmaline à partir de 0°, l'éclat diminue graduellement et disparaît; au-delà, l'on voit apparaître une seconde couleur complémentaire de la première. Une plaque de 0^{mm},1101 ne produit point de couleurs; la surface de pourtour des tourmalines croisées reste obscure; une plaque de 0^{mm},45 donne un blanc composé de toutes les couleurs. Des plaques d'une épaisseur intermédiaire entre 0^{mm},03149 et 0^{mm}46228 donnent toutes les couleurs de la table de Newton.

Si l'on forme un coin de sulfate de chaux dont l'épaisseur varie de l'une de ces limites à l'autre, on observe à la fois toutes les couleurs de Newton en bandes parallèles. Une portion de sulfate concave ou convexe donnerait les mêmes couleurs en lames concentriques. On peut tracer sur une plaque de sulfate de chaux, à différentes profondeurs, des traits réguliers et irréguliers plus ou moins profonds, de manière que le minéral présente plusieurs épaisseurs, et donne par conséquent plusieurs couleurs formant un ensemble régulier. On peut encore, sur une plaque de verre, coller tour à tour diverses petites lames dont on a d'avance déterminé la couleur. Si, après avoir tracé en relief, comme nous venons de le dire, un chiffre ou un dessin quelconque sur une lame de sulfate de chaux, on remplit les vides d'un baume ou fluide de même pouvoir réfringent, on aura un objet illisible ou invisible dans la lumière ordinaire, visible seulement dans la lumière polarisée.

Si dans la pince à tourmaline, ou dans un autre appareil semblable, on place une plaque de cristal à un axe taillé perpendiculairement à l'axe, on voit un système brillant d'anneaux colorés, coupés généralement par une croix noire rectangulaire, dont les bras se rencontrent au centre des anneaux. Les couleurs de ces anneaux sont généralement celles de la table de Newton. Si l'on fait tourner la seconde tourmaline, on voit dans les azimuts, 0°, 90°, 180° et 270°, le même système d'anneaux; mais dans les azimuts intermédiaires 45°, 135°, 225° et 315°, on voit des anneaux de couleurs complémentaires. La superposition de ces deux systèmes reproduirait de la lumière blanche.

Si l'on se sert de lumière homogène, on trouve que les plus petits anneaux sont produits par le rouge, les plus grands par le violet. Ils sont d'une grandeur intermédiaire dans les couleurs intermédiaires, mais toujours de la couleur de la lumière dont on se sert, et séparés par des anneaux noirs.

Les systèmes d'anneaux produits par les cristaux positifs, comme le zircon, la glace, quoiqu'à l'œil ils ne diffèrent en rien des cristaux négatifs, possèdent des propriétés différentes. Si l'on combine un système d'anneaux formés par la glace ou la zircon, avec un système d'anneaux de même diamètre formés par du spath d'Islande, on trouve que les deux systèmes se détruisent, l'un étant positif, l'autre négatif, ce qui vient nécessairement des deux sortes opposées de double réfraction que possèdent les deux cristaux.

Taillées perpendiculairement à la ligne moyenne, et placées dans les mêmes circonstances, les substances à deux axes laissent voir deux séries d'anneaux colorés. Les deux systèmes présentent, généralement parlant, les mêmes couleurs que les plaques minces ou que les anneaux des cristaux à un axe. Les couleurs commencent au centre de chaque système; mais à une certaine distance correspondante, par exemple au sixième anneau, les deux courbes, au lieu de se former séparément autour de leur pôle respectif, s'unissent pour se former en une courbe unique qui embrasse à la fois les deux pôles. Les deux systèmes d'anneaux sont d'ailleurs traversés chacun par une bande noire.

Si l'on diminue l'épaisseur de la plaque cristalline, les anneaux augmenteront, et ce sera maintenant, par exemple, le cinquième

anneau qui entoure à la fois les deux pôles. A une épaisseur moindre encore, le quatrième anneau embrassera les deux pôles, et ainsi de suite, jusqu'à ce que ces mêmes pôles soient entourés à la fois par tous les anneaux. L'apparence alors ne peut se distinguer de celle qui caractérise les cristaux à un axe, que par la forme elliptique des anneaux, et même les anneaux peuvent devenir circulaires, si la plaque est taillée perpendiculairement à un des axes de double réfration. Les lignes noires se sont élargies, et s'étendent indéfiniment sur le prolongement l'une de l'autre. Ces lignes noires représentent les traces des plans de polarisation, ou les lignes neutres, suivant lesquelles il n'y a pas de lumière transmise. Dans les cristaux à un axe, ces deux plans de polarisation sont rectangulaires entre eux. Pour les substances à deux axes, chaque système ne possède qu'un plan de polarisation indiqué par la ligne noire.

Pour quelques substances dont les axes sont fort rapprochés, on peut voir les deux systèmes à la fois; alors les deux anneaux sont réunis par une courbe extérieure dont les branches se croisent, et qui se confond avec une lemniscate; les deux systèmes d'anneaux sont elliptiques, et la trace des lignes neutres forme les deux branches opposées d'une hyperbole. Les anneaux colorés sont également visibles quand les deux plaques de tourmaline sont parallèles entre elles, au lieu d'être perpendiculaires; mais les anneaux sont complémentaires de ceux qu'on obtient par des plaques perpendiculaires; la croix et la base se dessinent en blanc.

Les cristaux qui ont une plus grande double réfraction ont la propriété de donner la même couleur à des épaisseurs moindres ou bien à des inclinaisons de l'axe moindre. Pour comparer les intensités de polarisation de différents cristaux, la meilleure manière est de comparer les teintes que produit une épaisseur donnée de chaque cristal, taillée perpendiculairement à l'axe, c'est-à-dire dans la direction où les forces doublement réfringentes et polarisantes sont au maximum. Les épaisseurs qui, dans les cristaux à un axe, produisent la même teinte jaune, sont, pour le spath d'Islande. 0,000700 millim.; pour la tourmaline, 0,029375; pour le quartz, 0,065600; pour une certaine variété d'apophyllite, 9,165500. Parmi les cristaux à un axe, les épaisseurs suivantes : 0,003375 mil-

limètres, nitre ; 0,019125, mica ; 0,048000, sulfate de baryte, correspondent à la même teinte.

M. Herschell désigne sous le nom d'équatoriale la teinte manifestée sous l'incidence perpendiculaire par une lame d'une épaisseur donnée, et dans une direction perpendiculaire aux axes optiques. On déduit facilement de cette teinte l'énergie biréfractive du cristal, énergie proportionnelle à la séparation angulaire des images. Cette teinte équatoriale varie d'une substance à l'autre dans des limites très éloignées ; elle est, par exemple, représentée pour le spath d'Islande par le nombre 35,801 ; par 1,246 pour la strontiane hydratée, par 851 pour la tourmaline, par 512 pour le quartz, par 101 pour le camphre ; par 41 pour la vésuvienne ; par 3 pour une certaine variété d'apophyllite ; dans les cristaux à un axe, elle est de 7,400 pour le nitre, de 1,307 pour le mica, de 521 pour le sulfate de baryte, etc., etc.

Dans la lumière homogène, les anneaux sont des courbes de même couleur que la lumière employée, séparées par des intervalles sombres. Dans la lumière blanche, les systèmes d'anneaux sont superposés, l'ensemble devient irrégulier. Les deux centres ou les moitiés du premier ordre de couleur, sont disposées en longs spectres formées de rouge, de vert, de violet ; les extrémités de tous les autres anneaux sont rouges en dehors et blanches en dedans.

Dans beaucoup de cristaux, le diamètre des anneaux vus dans différentes couleurs varie très peu ; les centres, ou pôles, changent à peine de place ; mais, dans certains cristaux, la soude, le tartrate de potasse, la variation de grandeur des anneaux est énorme ; ils sont plus grands dans le rouge, plus petits dans le violet ; dans d'autres substances cristallines, les anneaux rouges sont les plus petits, les violets sont les plus grands. La succession de couleur, dans ces cristaux anormaux, s'éloigne donc évidemment de l'échelle des teintes que Newton a construite à l'aide de ses observations sur les lames minces, et qui, depuis, a toujours été l'alphabet de l'optique supérieure. M. Herschell a trouvé que cette déviation peut très bien s'expliquer en concevant que l'axe de double réfraction est différent pour les différentes couleurs. Dans les cristaux à deux axes, une pareille déviation est presque générale, comme dans le sel de La Rochelle, où le phénomène est très

marqué. Le bicarbonate de potasse est dans le fait regardé comme le seul cristal à deux axes soumis à l'examen, où les axes pour toutes les couleurs sont exactement coïncidents.

M. Herschell a trouvé encore certaines variétés d'apophyllite dans lesquelles la structure qui détermine la double réfraction est positive pour les rayons rouges, négative pour les rayons violets, tandis que, pour les rayons indigo intermédiaires, il n'y a pas de double réfraction du tout. Certains cristaux de glaubérite sont de même à deux axes pour les rayons rouges, et ces deux axes sont alors séparés de 5°. Les axes pour les rayons violets coïncident, et le cristal est à un axe. Cette particularité remarquable que l'on découvrit, en se servant de lumière homogène, a été souvent confirmée par les expériences les plus décisives, et se conçoit d'ailleurs sans difficulté aucune dans la théorie des ondulations.

M. Brewster affirme que la singularité de ces phénomènes peut être rigoureusement calculée, en supposant que les axes résultants dans les cristaux qui ont deux axes, ou le seul axe dans ceux qui n'en ont qu'un, avec un système d'anneaux, déviant de la table de Newton, soient des axes seulement apparents, ou axes de compensation produite par l'action opposée de deux ou plusieurs axes rectangulaires, dont le principal est la ligne qui bisexte l'angle formé par ces deux axes résultants. En partant de ce principe, ajoute le savant physicien anglais, on peut calculer les phénomènes chromatiques des cristaux avec autant de précision que les mouvements des corps célestes.

Le quartz a besoin d'être en plaques extrêmement minces pour laisser apercevoir une ombre bleuâtre de la croix produite par les traces des plans de polarisation; si la plaque a une certaine épaisseur, la croix disparait entièrement, et la surface de l'anneau intérieur présente une teinte unie due à l'épaisseur de la plaque. Si même on augmente cette épaisseur, les anneaux disparaissent complétement, et la plaque n'offre qn'une seule teinte sur sa surface. Cette teinte est, comme nous l'avons dit pour le sulfate de chaux, en rapport avec l'épaisseur de la plaque, de sorte qu'on peut tailler des plaques de quartz donnant avec la lumière polarisée le rouge, le jaune, l'orangé, etc., etc. Si même on taille une plaque de manière qu'elle présente en creux une calotte sphérique, elle donnera,

dans l'appareil, des cercles diversement colorés, correspondant aux diverses épaisseurs de la plaque.

Ce minéral possède, en outre, un phénomène curieux, qui a été mis à profit par Savart pour découvrir la plus légère trace de lumière polarisée. Lorsqu'on présente à un rayon polarisé une lame de cristal de roche, taillée de manière que l'une de ses faces soit parallèle à l'axe, et l'autre un peu inclinée, le prisme très allongé qu'elle forme donne, même à l'œil nu, des bandes rouges ou vertes, pourvu que l'on regarde d'un peu loin, et que l'épaisseur du prisme près de son sommet ne dépasse pas le tiers ou la moitié d'un millimètre. Les bandes parallèles sont plus vives quand on les regarde avec une tourmaline, et il est facile de reconnaître qu'elles atteignent leur maximum d'éclat quand la section principale du prisme fait avec le plan de polarisation un angle de 45°. Des lames obliques à l'axe présentent par leur croisement des bandes analogues : d'après cette propriété, lorsqu'on a travaillé une lame de cristal de roche de 4 ou 5 millimètres d'épaisseur, de manière que ses faces soient bien parallèles entre elles, et parallèles en outre à l'une des faces de la pyramide qui termine ordinairement les cristaux naturels, et qu'ensuite on coupe cette lame pour superposer les deux moitiés en croisant la ligne de section, le système qui en résulte donne dans la plaque à tourmaline des bandes parallèles très vives. Si ces bandes sont dans le plan de polarisation de la lumière qui a traversé la première tourmaline, elles présentent au milieu une bande noire entre deux bandes blanches, et se colorent ensuite de chaque côté. C'est le contraire quand elles sont perpendiculaires au plan primitif de polarisation ; on observe alors une bande blanche entre deux noires, et toutes les couleurs précédentes sont renversées.

M. Délezenne a constaté que tous les cristaux à un axe taillés en lames parallèles à l'axe et d'une épaisseur convenable, donnent non plus des bandes parallèles comme le quartz, mais quatre systèmes de bandes hyperboliques très bien caractérisés, surtout quand on les observe avec la lampe monochromatique. Lorsqu'au lieu de soumettre à l'expérience un seul cristal, on prend, par exemple, des lames de cristal de roche épaisses de 7 ou 8 millimètres, légèrement prismatiques, parallèles à l'axe et posées l'une sur l'autre

de manière que les axes soient croisés, on observe quatre systèmes de bandes hyperboliques régulières. Pour apercevoir distinctement les hyperboles, il faut, après avoir mis les deux prismes dans la pince à tourmaline, approcher l'œil de très près ; car aussitôt que l'on regarde à une distance un peu grande, les hyperboles dégénèrent en bandes parallèles.

L'étude du diamètre des anneaux est d'un usage pratique très commode pour reconnaître les hémitropies dans les pierres taillées, où aucune strie, aucune indication intérieure, ne les dévoilent. Haüy a désigné sous le nom d'hémitropie, les cristaux qui présentent des angles rentrants dus à un croisement symétrique de deux cristaux. Le plan de jonction des deux cristaux est ordinairement parallèle à une des faces du cristal simple ou à un de ses plans diagonaux.

Il suffit de placer la plaque dans la pince à tourmaline successivement sur une face ou sur l'autre ; s'il n'existe pas d'hémitropies, ce changement n'en apporte aucun dans le diamètre des anneaux. Dans le cas contraire, l'hémitropie divisant pour ainsi dire la plaque en deux plaques accolées d'épaisseurs diverses, on verrait, par cette intervention, des anneaux de dimensions différentes, ce qui tient à ce que dans un cas on voit les anneaux que donne la plaque supérieure, dans l'autre les anneaux de la plaque inférieure. En mesurant exactement les dimensions des deux séries d'anneaux, on peut même déterminer par cette observation la position du plan d'hémitropie.

Si l'hémitropie, au lieu d'être placée sur l'épaisseur de la plaque, était dans le sens de sa longueur, ce moyen ne pourrait plus servir ; mais la coloration différente que prennent les deux parties de la plaque sous le polariscope ou avec l'appareil de Noremberg, l'indiquerait immédiatement ; la plaque paraîtrait alors séparée en deux segments par une ligne qui la traverserait dans toute sa longueur ; un d'eux affecterait un certaine couleur, tandis que l'autre en offrirait une différente.

Pour faire naître les phénomènes que nous venons d'étudier, il fallait que la lumière fût deux fois polarisée, une fois avant de pénétrer le cristal, une seconde fois après la sortie du cristal. Dans certains cas ils sont produits par la lumière ordinaire en ce sens qu'on

peut supprimer l'une ou même l'une et l'autre plaque polarisante. Si, par exemple, l'on fait tomber le rayon lumineux sur une plaque de topaze de manière qu'elle soit réfractée le long de l'un des axes, et réfléchie par la seconde surface, on voit apparaître un système d'anneaux. Plusieurs cristaux de nitre donnent leurs anneaux sans lumière polarisée ou sans plaque d'analyse. M. Herschell a trouvé que quelques cristaux de carbonate de potasse possédaient la même propriété.

Observons en finissant que l'angle des deux axes d'un cristal peut être tel, qu'à la lumière blanche et composée du ciel, on ne pût voir aucune couleur, aucune courbe de quelque manière qu'on inclinât le cristal; mais à la lumière homogène, à celle, par exemple, de la lampe à alcool salé, ces courbes seront toujours visibles, même sous l'incidence perpendiculaire, pourvu que le cristal ne soit pas extrêmement mince; car, dans ce cas, il faudrait l'incliner pour apercevoir les premières courbes. En général, un cristal à deux axes taillés perpendiculairement à l'un de ses trois axes rectangulaires, montre à la flamme monochromatique des courbes dans tout le champ de la vision. Ces courbes sont des lemniscates, si c'est l'axe principal qui est perpendiculaire aux faces; ce sont des hyperboles, si c'est l'axe secondaire ou l'axe tertiaire qui est perpendiculaire aux faces. Lorsque le cristal est plus épais, les courbes se serrent davantage, et des cercles en plus grand nombre se forment autour de chaque pôle; quand l'angle des axes est plus petit, les lemniscates prennent des formes plus rapprochées du cercle; quand cet angle est nul, le cristal devient à un seul axe perpendiculaire, toutes les lemniscates sont transformées en cercles. Si l'angle des axes, grandissant toujours, devenait égal à deux angles droits, on retomberait dans le cas d'un seul axe situé cette fois dans les faces du cristal : les lemniscates sont alors transformées en hyperboles équilatères visibles seulement à la lumière homogène. Les cristaux obliques donnent également des courbes visibles à la lumière homogène, lors même qu'ils n'en laissent voir aucune à la lumière blanche; si l'on veut par conséquent ne laisser échapper aucun des phénomènes de la polarisation chromatique, il faut absolument répéter les expériences dans de la lumière homogène obtenue à l'aide d'un prisme, ou au moyen de la lampe à alcool salé : cette dernière lu-

mière peut être regardée comme simple, quoique, observée à travers un prisme de verre d'un angle de 60°, elle paraisse bordée d'une large bande colorée dans laquelle on peut distinguer le vert, le bleu, l'indigo et le violet, mais en très petites proportions.

Il est très facile de mesurer les hyperboles qu'on obtient quand on fait passer au travers d'un cristal taillé parallèlement à l'axe, un faisceau de lumière monochromatique polarisée, et qu'on l'analyse par une tourmaline; et ces hyperboles, dont les dimensions dépendent de la puissance réfractive du cristal, sont un caractère plus approprié à la construction d'une table des forces biréfringentes que tout autre procédé fondé, soit sur l'écart des images doubles, soit sur l'emploi des compensations avec le quartz ou le gypse. L'axe de ces doubles hyperboles étant donné par l'angle qu'il soutend, on peut en conclure pour une lumière homogène le rapport des deux constantes de la double réfraction, ou celui des équivalents optiques maximum et minimum qui ont lieu perpendiculairement au plan des axes ou de l'axe du cristal. Dans les cas où l'on peut casser en deux la lame biréfringente, on obtient de suite, en croisant les deux fragments, les hyperboles de compensation, et par la mesure de leurs axes, le rapport des équivalents optiques des deux réfractions. Jusqu'ici l'on ne connait ces éléments, qui tiennent de si près à la constitution intime des corps, que pour une dizaine de cristaux, comme on peut le voir dans les traités d'optique de MM. Herschell et Brewster.

La liaison entre les caractères optiques et cristallographiques est si intime que nul changement ne peut avoir lieu dans les uns sans que les autres en soient modifiés. Ainsi, puisque la compression et la dilatation, produites par des causes mécaniques ou physiques, donnent aux corps transparents une structure produisant les mêmes effets que la cristallisation, il fallait nécessairement que les phénomènes optiques fussent modifiés. On voit alors en effet apparaitre des anneaux, des couleurs qui n'existaient pas; les anneaux préexistants sont déformés, les couleurs sont altérées, les lignes sont multipliées, etc., etc.... On voit même alors apparaître de nouvelles lois générales semblables à celles-ci, qui furent énoncées par M. Brewster. Les cristaux positifs, comprimés de manière que l'axe ou la direction de la compression soit parallèle à l'axe du cristal,

ont un ordre de teintes plus élevées. Les cristaux négatifs, dilatés de manière que l'axe de dilatation soit perpendiculaire à l'axe du cristal, offrent un ordre de teintes plus abaissées.

Ainsi encore, puisque, suivant les observations de M. Mitscherlich, le spath d'Islande devient moins obtus par l'action de la chaleur, et approche davantage du cube, on pouvait s'attendre à voir diminuer son pouvoir réfringent. C'est, en effet, ce que M. Mitscherlich a reconnu par des mesures directes. Le même physicien a découvert plus récemment ce fait singulier que le gypse ou sulfate de chaux ordinaire, qui a des températures moyennes à ses deux axes optiques à 60° l'un de l'autre, est notablement modifié par l'élévation de la température. Les axes se rapprochent et finissent par se réunir; mais si la chaleur augmente, ils se séparent de nouveau dans un plan perpendiculaire au plan de clivage. Le cristal dont il s'agit change de constitution chimique à une température si basse, par la perte de son eau de cristallisation, qu'il était naturel de s'attendre à le voir éprouver par la chaleur des effets plus marqués que d'autres corps plus stables. M. Steinheil a reconnu que les teintes manifestées par une lame de sulfate de chaux exposée à la lumière polarisée s'élèvent rapidement dans l'échelle lorsque la lame est chauffée modérément par la flamme d'une chandelle tenue à une certaine distance au-dessus d'elle, et descendent quand la chaleur diminue. Soumis à la même épreuve, le mica n'éprouve aucun changement sensible dans la position de ses axes ou la grandeur de ses anneaux, même quand on pousse la chaleur jusque près de l'ignition.

M. Babinet a remarqué aussi que la forme de plusieurs cristaux à base carrée ou hexaèdre semble indiquer un cristal à un axe, tandis que l'expérience donne deux hyperboles noires, comme dans le nitre, cristal à un axe : c'est ce qui arrive, par exemple, pour le borate de magnésie électrique par la chaleur, l'arséniate de potasse de la chimie, etc. M. Babinet pense que, dans ce cas, la substance a pu perdre de l'eau de cristallisation, et passer ainsi à l'état de cristal à deux axes, comme il l'avait éprouvé sur le sulfate de quinine, qui, frais préparé, donne une croix noire bien nette, et qui donne des hyperboles noires quand il est desséché.

Dans un mémoire vraiment remarquable, M. Rudberg a donné ,

en 1828, les résultats d'expériences entreprises par lui sur la réfraction de la lumière colorée dans les cristaux biréfringents, au moyen des raies du spectre solaire. Ces recherches délicates l'ont conduit à quelques lois assez nettement formulées. 1° Dans les cristaux à un axe, la double réfraction est d'autant plus forte que la réfrangibilité individuelle de la couleur est plus grande. 2° Dans l'aragonite, l'inclinaison des axes optiques diminue continuellement depuis la lumière violette jusqu'à la lumière rouge. 3° C'est le contraire dans la topaze, où l'inclinaison des axes optiques va en diminuant avec la réfrangibilité des rayons. Nous avons déjà dit que M. Herschell avait découvert cette même anomalie dans le sulfate de baryte et le sel de La Rochelle. M. Brewster avait remarqué, de plus, que tous les cristaux dans lesquels l'inclinaison des axes optiques augmente avec la réfrangibilités ont les extrémités rouges de leurs systèmes d'anneaux intérieures ou dirigées vers celui des axes de cristallisation qui bissecte l'angle aigu des axes optiques, tandis que ceux dans lesquels l'inclinaison décroît avec la réfrangibilité ont les extrémités rouges de leurs anneaux extérieures ou dirigées vers celui des axes qui bissecte l'angle obtus des axes optiques.

Dans un second mémoire, inséré dans les *Annales de Poggend.*, M. Rudberg a publié des recherches sur les variations que subit la double réfraction dans les cristaux par des changements de température, et est arrivé à des résultats qui tendent à confirmer les observations de M. Mitscherlich sur le même sujet.

M. Babinet a remarqué qu'une lame d'émeraude donne des anneaux à croix noire, comme doit le faire un cristal uni-axe; qu'une lame de béryl donne une ligne noire semblable au chiffre 8, et qui défie toute théorie. Ce cristal est autre chose encore qu'un cristal bi-axe.

Dans plusieurs cristaux, par exemple le zircon, le béryl, le centre des branches n'est pas noir. Ce centre est analogue au centre des anneaux du quartz, et cependant il ne paraît pas y avoir rotation du plan de polarisation.

Autre fait : la forme de plusieurs cristaux à base carrée ou hexaèdre semble indiquer un cristal à un axe, et l'expérience donne deux hyperboles noires comme dans le nitre. Exemples : cristal à

deux axes, le borate de magnésie électrique par la chaleur, l'arséniate de potasse de la chimie.

Enfin, beaucoup de cristaux ont une structure bien plus compliquée que celle qui résulterait du nombre de leurs axes, et, plusieurs minéraux doivent être considérés comme composés d'un assemblage en mosaïque très curieux de cristaux placés dans des positions différentes et arrangés dans un ordre très complexe, quoique très symétrique. Ainsi, comme nous l'avions déjà vu, M. Brewster a trouvé que l'améthyste est formée de différentes parties qui agissent différemment sur la lumière et d'une manière alternative et complémentaire. Ces parties sont, en général, des coins avec leurs arêtes situés vers l'axe du cristal, ou une série de V incrustés l'un dans l'autre et présentant le contour extérieur de pareils coins.

La structure optique de l'analcime est, sous plusieurs rapports, plus curieuse encore et plus complexe. Sa forme ordinaire est l'icositétraèdre, figure dérivant du cube et appartenant à des cristaux qui ne donnent naissance à aucun phénomène dans la lumière polarisée; mais l'analcime peut être séparée en vingt-quatre solides jouissant de propriétés optiques particulières.

Les apophylites d'Islande et de Féroë, la topaze du Brésil et beaucoup d'autres minéraux ont une structure lamellée très curieuse. M. Biot, dans ces derniers temps, a longuement étudié les effets de ce genre particulier de structure lamellaire; il a désigné sous le nom de polarisation lamellaire les effets qu'il produit. Cette désignation nous semble tout-à-fait irrationnelle, et nous gémirions de la voir entrer dans la science. Nous comprenons qu'une molécule d'éther en mouvement décrive une ligne droite, un cercle ou une ellipse, et par conséquent les mots polarisation rectiligne, circulaire, elliptique, ont pour nous un sens net et tout-à-fait défini; mais la molécule lumineuse ne peut pas décrire une surface, une lamelle; il ne peut y avoir par conséquent, sous ce rapport, de polarisation lamellaire. Nous entendons aussi très bien qu'un rayon puisse être polarisé par réflexion, par réfraction, par absorption, etc., et la polarisation due à l'action des lamelles ne nous étonnerait pas, alors même qu'elle ne devrait pas nécessairement rentrer dans un des genres précédents; mais ici encore le nom de *polarisation lamellaire* est impropre. Quoi qu'il en soit de cette légère critique,

qu'on nous pardonnera dans l'intérêt de la science, et qui ne déroge pas au profond respect que nous avons toujours porté à l'une des plus grandes gloires de la France, à l'un des savants les plus éminents de l'Europe, le mémoire de M. Biot, dont nous empruntons l'analyse au traité de minéralogie de M. Dufresnoy, contient une foule de faits bien décrits, bien analysés.

Les lois si remarquables qui établissent entre la forme cristalline et la double réfraction une relation intime, présentaient quelques anomalies apparentes, dont la physique ne savait pas rendre compte. M. Brewster avait annoncé que certaines substances cristallisées dans le système régulier, entre autres la *boracite*, l'*analcime*, et quelquefois le sel *gemme*, donnaient des phénomènes de double réfraction ; d'où il résultait, ou que la forme de ces substances était mal connue, ou que la double réfraction présentait des anomalies, comme quelques unes des lois de la nature. Plusieurs minéralogistes avaient la pensée que peut-être le système cristallin de la *boracite* était mal défini ; mais pour l'*analcime* et le sel *gemme*, aucun doute n'était permis. Les modifications symétriques de l'analcime dans ses divers cristaux, le clivage triple et si net du sel gemme, la régularité des cristaux artificiels de cette substance, étaient des caractères trop marqués pour que leur forme ne fût pas certaine. M. Biot, guidé par la théorie, ne pouvait concevoir ces anomalies. Un raisonnement simple, et que nous avons déjà eu l'occasion de citer, lui montrait avec évidence qu'une substance qui cristallise dans le système régulier ne pouvait posséder la double réfraction. Il étudia donc successivement les minéraux pour lesquels ces anomalies étaient indiquées, et bientôt il s'aperçut que le fait n'était pas constant, et que, lorsqu'il existait, il devait tenir à une cause particulière. Enfin, M. Biot remarqua qu'il y avait une liaison entre le pouvoir de polarisation de plusieurs des substances considérées comme anomalies et le clivage qu'elles présentaient. Il pensa alors qu'il pouvait y avoir de l'analogie entre ce phénomène et celui qu'une pile de glaces exerce sur la lumière. Les nombreuses expériences que M. Biot a faites sur ce sujet ont confirmé ses prévisions et l'ont conduit à la théorie de la *polarisation lamellaire*, dont il a exposé les lois dans un mémoire publié il y a deux ans.

Ce grand travail faisant disparaitre les différentes anomalies ap-

parentes qui semblaient porter atteinte à la relation qui unit la forme cristalline aux propriétés optiques des minéraux, nous croyons utile d'en faire connaître sommairement les principaux résultats.

Les cristaux d'alun ont fait la base principale du mémoire de M. Biot; les autres substances qu'il a étudiées ne sont pour ainsi dire qu'une application des mêmes faits.

En interposant devant un prisme de Nicol un cristal octaèdre d'alun enfermé dans un tube métallique, fermé par des glaces à faces parallèles, et entouré d'une solution saturée de même nature, ce cristal dépolarise la lumière et rend la glace visible, excepté dans deux positions rectangulaires entre elles, qui sont celles où les plans menés par son axe, perpendiculairement à ses faces, deviennent respectivement parallèle et perpendiculaire au plan de polarisation primitive.

Le rayon polarisé traverse le cristal sans être modifié, quand le plan de polarisation coïncide avec les sections principales de l'octaèdre, ou leur est perpendiculaire. En effet, si on amène le cristal d'alun dans une de ces positions, en tournant convenablement le tube qui le renferme, le plan paraîtra noir. Mais pour peu qu'on détourne le tube vers la droite ou vers la gauche, les quatre triangles qui forment la projection des faces du cristal s'illuminent d'une lueur blanche, laquelle croît en intensité jusqu'à ce que les plans normaux ou les faces aient tourné de 45 degrés. Au-delà de ce terme, l'action de l'octaèdre s'affaiblit par les mêmes périodes; elle redevient nulle quand la rotation a accompli un quadrant complet; après quoi les phénomènes recommencent de la même manière. Ainsi, pendant ce mouvement de rotation autour de son axe, le cristal d'alun agit comme ferait une plaque de boracite ou de cristal de roche, dont la section principale coïnciderait avec les plans normaux aux faces latérales, ou leur serait perpendiculaire. Pour rappeler cette analogie, M. Biot désigne ces plans normaux aux faces, sous le nom de *sections principales* de l'octaèdre d'alun.

L'action de l'alun est faible quand on l'étudie dans le sens qui vient d'être indiqué, et il serait difficile d'en suivre les différents degrés d'énergie, sans un artifice de physique qui rend les moindres nuances manifestes. Il consiste à mettre entre l'octaèdre d'alun

et le prisme de Nicol une lame très mince de chaux sulfatée, placée fixement dans un azimut de 45° autour du plan de polarisation primitif du rayon incident. Le rayon polarisé la colore de teintes en relation avec son épaisseur. Le cristal d'alun, vu à travers cette plaque, s'illumine de couleurs brillantes dues à l'action simultanée de la lame et du cristal. Pour rendre cette expérience très sensible, on choisira la lame de chaux sulfatée dans des conditions de minceur telle, que sa teinte propre soit le plus rapidement et le plus vivement modifiable. Cette épaisseur correspond au nombre 21 de la table que Newton a dressée de la sensibilité des anneaux colorés, laquelle donne pour teinte réfléchie le gris de lin, ayant pour complément le jaune verdâtre; car la moindre augmentation d'épaisseur fait descendre cette teinte à un bleu foncé, puis à un vert de pré très vif; tandis que la moindre diminution la fait monter au rouge de sang, puis au rouge écarlate des œillets.

Les choses étant ainsi disposées, quand le cristal d'alun est placé de manière que l'une des sections principales de l'octaèdre soit dans le plan de polarisation primitif, ce qui rend l'autre section principale perpendiculaire à ce même plan, alors l'action dépolarisante de l'alun étant nulle, la lame de chaux sulfatée conserve sa teinte propre; mais aussitôt qu'on tourne le cristal, la couleur change, et la projection carrée de l'octaèdre se partage en quatre triangles égaux; et quand une de ses sections principales est à 45° du plan de polarisation primitif, alors l'une d'elles coïncide avec la section principale de la lame de chaux sulfatée, et les faces de l'octaèdre qui y correspondent se présentent sous la forme de triangles rouges; l'autre section est perpendiculaire, et les triangles qui forment les projections des deux autres faces de l'octaèdre sont verts. L'action exercée par le cristal d'alun s'ajoute donc à celle de la chaux sulfatée pour le fuseau où sont situés les triangles verts, elle s'en retranche dans le fuseau où se forment les triangles rouges : phénomène analogue à celui qu'exercerait un cristal doué de la double réfraction.

L'étude de la structure intime des octaèdres d'alun montrant qu'ils sont formés de lames successives superposées, M. Biot a comparé leur action à celle d'une pile de glaces. Toutefois une grande différence se présente : c'est que, dans ce dernier cas, la

polarisation n'est pas chromatique comme pour le cristal d'alun : « Mais cela tient à ce que pour l'alun, dit M. Biot, chaque fuseau » octaédrique enlève seulement à la polarisation primitive un groupe » d'éléments lumineux associés suivant certaines conditions de ré- » frangibilité ; leur imprime généralement un sens de polarisation » distinct de celui de la pile artificielle, et communique tant à ce » groupe qu'au groupe complémentaire certaines dispositions per- » sistantes en vertu desquelles ils se polarisent ultérieurement » dans les lames minces douées de la double réfraction moléculaire, » comme s'ils avaient déjà traversé une lame d'un pouvoir défini. »

Les cristaux d'alun possèdent des lames sur chacune de leurs faces ; si donc la comparaison établie entre l'action de cette substance sur la lumière et celle d'une pile de glaces est juste, comme le pouvoir polarisant d'un système lamellaire croît avec la longueur du trajet que la lumière y parcourt, on doit pouvoir rendre un système dominant sur les autres en taillant, dans les cristaux d'alun, des plaques parallèles aux faces. Effectivement, M. Biot, ayant préparé des plaques dans le sens d'une des faces des cristaux d'alun octaèdre, a observé :

1° Qu'elles ne modifient pas le rayon polarisé lorsqu'il traverse ces plaques sous l'incidence normale, et loin de ses bords ; dans ce cas, elles n'altèrent en aucune manière la couleur propre de la lame sensible de chaux sulfatée ;

2° Que, sous l'incidence oblique, les plaques d'alun modifient au contraire considérablement la couleur des lames de chaux sulfatée ; en effet, ces plaques ont fait descendre les teintes résultantes, par addition, jusqu'au vert bleuâtre dans le troisième ordre d'anneaux, et les ont fait remonter, par soustraction, dans le second ordre, jusqu'au rouge jaunâtre : amplitude plus grande que celle que M. Biot eût observée pour des octaèdres complets.

Cette seconde expérience montre l'influence du système lamellaire sur la propriété dépolarisante de l'alun ; mais ce qui l'établit d'une manière encore plus précise, c'est la différence qui existe entre certains cristaux d'alun, dans leur aptitude à produire ces phénomènes, selon qu'ils contiennent ou qu'ils ne contiennent pas d'ammoniaque. Ainsi, les cristaux les plus nets d'alun préparés par M. Pelouze, et entièrement exempts de cet alcali, sont complétement inactifs,

même sur les lames de chaux sulfatée les plus sensibles ; tandis que tous les petits cristaux d'alun ammoniacal, même ceux qui ne contiennent que six à sept millièmes de cette substance, donnaient des effets très prononcés. Ce résultat est d'autant plus singulier que le sulfate de potasse et le sulfate d'ammoniaque sont isomorphes. Ainsi, l'alun a pour composition un équivalent de sulfate d'alumine et vingt-quatre équivalents d'eau, unis à un autre équivalent de sulfate de potasse, de sulfate d'ammoniaque, ou de ces deux sulfates réunis. La présence d'une certaine quantité de sulfate d'ammoniaque, qui n'a aucune action sur la forme, en a probablement sur la texture. Cette circonstance, du reste, ne doit pas surprendre, puisque, d'une part, les formes secondaires sont en rapport avec les eaux-mères dans lesquelles la cristallisation a lieu, et que, de l'autre, dans les minéraux, les clivages varient quand la composition, atomiquement la même, n'est pas identique sous le rapport des éléments : c'est ce qui a lieu pour le pyroxène et le diopside, et pour certaines variétés de chaux carbonatée, qui admettent des clivages supplémentaires.

Le sel présente une reproduction complète des phénomènes de l'alun ; cette substance possède des clivages cubiques, et M. Biot a constaté également que c'est le système lamellaire qui produit la dépolarisation, qui, du reste, n'est pas constante dans tous les échantillons ; certaines variétés de sel ne la lui ont pas offerte, entre autres des cristaux de sel cubiques parfaitement limpides obtenus dans le laboratoire de l'École polytechnique.

Mais, outre les phénomènes communs à l'alun, le sel gemme a offert à M. Biot une circonstance remarquable qui a pu induire les physiciens en erreur dans l'étude de quelques échantillons. Cette circonstance est d'autant plus intéressante qu'elle a un certain rapport avec le gisement du sel ; c'est que des échantillons de sel des Pyrénées et de Bex lui ont donné des phénomènes analogues à ceux que des verres trempés développent quand on les soumet à la lumière polarisée. M. Biot a pu les reproduire artificiellement en trempant le sel, c'est-à-dire en le refroidissant brusquement par une goutte d'alcool, après l'avoir chauffé fortement sur une plaque de tôle.

Pour bien faire comprendre ces résultats, nous rappellerons

qu'une plaque de glace n'a aucune action sur la lumière polarisée, mais la même glace dépolarise la lumière après avoir été trempée; elle donne alors des dessins colorés analogues à certaines figures que présentent quelques minéraux. Ce qui distingue ces phénomènes de ceux de la polarisation, c'est qu'ils sont en relation avec la forme extérieure de la glace. Les dessins d'une glace carrée sont différents de ceux de glaces oblongues, rhomboïdales, ovales, etc.; de plus, si on casse une de ces glaces, les dessins changent, chaque fragment en présente de particuliers, et qui sont en rapport avec la direction de la cassure. Pour des cristaux bi-réfringents, la forme des plaques n'influe pas sur les phénomènes optiques; dans l'alun, le sel non trempé, il en est de même; mais le sel refroidi brusquement se trouve dans des conditions exactement analogues à celles du verre trempé: les dessins changent avec la forme extérieure, comme si l'arrangement moléculaire interne était le résultat de l'ébranlement donné par la percussion.

Nous remarquerons que le sel des Pyrénées, ainsi que le sel de Bex, qui donnent ces singuliers phénomènes, appartient à des dépôts anormaux, et que toutes les circonstances géologiques qui les accompagnent ont fait regarder leur origine comme en rapport avec l'arrivée au jour de certaines roches ignées. On comprendrait dès lors que quelques parties de ce dépôt aient pu être refroidies brusquement et offrir des phénomènes de trempe. Ce résultat optique est donc une confirmation des recherches des géologues modernes, et il nous a paru intéressant de l'indiquer.

La *chaux fluatée*, l'*amphygène*, l'*ammoniaque muriatée*, l'*analcime* et la *boracite* ont donné à M. Biot des phénomènes à peu près analogues à ceux de l'alun. Il en résulte que la propriété d'agir sur la lumière polarisée, que l'on avait reconnue dans certains cristaux appartenant au système régulier, ne leur serait pas propre et exceptionnelle. « Tous, dit M. Biot, en seraient susceptibles, non molé-
» culairement, mais comme agrégation de masses d'un volume
» fini, distribuées en systèmes distincts avec un ordre régulier d'ap-
» position. D'après cela, quand la symétrie des formes externes d'un
» cristal indiquera une forme génératrice pareillement symétrique,
» on ne devra pas exiger comme une condition nécessaire que le
» cristal total n'agisse point sur la lumière polarisée, mais seulement

» que son action, si elle se manifeste, ne soit point moléculaire,
» ce que l'on pourra toujours constater en observant les lois phy-
» siques qu'elle suit. Inversement, lorsqu'on verra qu'un cristal
» modifie la lumière polarisée, on ne devra pas inférer de cette seule
» apparence que sa forme génératrice est dissymétrique ; mais il
» faudra étudier les lois de l'action pour savoir si elle appartient à la
» masse totale et aux molécules constituantes considérées dans leur
» individualité. »

D'après les lois ordinaires de la double réfraction, l'*apophylite*, dont la forme est le prisme à base carrée, ne doit présenter qu'un axe de double réfraction.

Cependant, quand on soumet une plaque d'apophylite de Feroé perpendiculaire à l'axe de cristallisation, qui, dans ce cas, est également l'axe optique, à l'action de la lumière polarisée, la manière dont les teintes extraordinaires s'y dégradent, d'abord quand on incline les plaques, et leur évanouissement sous une certaine incidence, simulent presque complétement les effets que produisent les cristaux à deux axes. En effet, la lumière polarisée, transmise dans le plan de ces lignes, et alternativement de part et d'autre de l'une d'elles, amène un point neutre intermédiaire. Cette ressemblance avait fait supposer à M. le docteur Brewster que les plaques d'apophylite de Féroë agissant ainsi, possédaient réellement deux axes de double réfraction moléculaire, et constituaient conséquemment une espece particulière, différentes de celle qui ne produisent pas de telles alternatives.

Les expériences de M. Biot, què nous avons ci-dessus rapportées, ont fait penser à ce célèbre physicien que la polarisation lamellaire simulait peut-être cette anomalie ; il a en conséquence repris toutes les expériences de M. Brewster sur cette question intéressante, et il en a en outre fait d'autres analogues à celles qu'il avait exécutées sur l'alun. Ces expériences ont confirmé les prévisions de M. Biot, et rendu toute leur généralité aux belles lois de l'optique minéralogique.

L'apophylite possède, outre le clivage si facile, parallèle à sa base, et qui lui a fait donner son nom, des stries indiquant également un tissu lamellaire dans le sens des quatre faces qui en forment le pointement. M. Biot admet donc qu'il existe un axe de double ré-

fraction moléculaire attractif, coïncidant avec l'axe du prisme primitif; plus, deux ordres de systèmes lamellaires, l'un perpendiculaire à cet axe, et existant toujours avec des degrés inégaux d'intensité; les autres occasionnels et composés de lames dirigées obliquement à cet axe. « Le caractère attractif de l'axe, dit-il, est » ici une circonstance très importante; car étant normal au système » lamellaire transversal qui existe toujours, et qui agit dans la di- » rection de ses propres lames avec le caractère attractif, il en ré- » sulte que, dans toutes les positions possibles des cristaux d'apo- » phylite, ces deux genres d'action s'exercent toujours sur la » lumière polarisée *simultanément* et en *opposition*, comme feraient » des lames douées de réfractions moléculaires de même nature, » dont les sections principales seraient croisées rectangulairement. Si » le pouvoir moléculaire de double réfraction et de polarisation » exercé par l'apophylite était très énergique, cette opposition » pourrait ne pas produire des résultats sensibles, ou n'en produire » que dans les directions de transmission très voisines de l'axe. » Mais l'excessive faiblesse du pouvoir moléculaire de double ré- » fraction, dans l'apophylite, laisse toujours sensible l'action du » système lamellaire transversal qui lui est opposée. Ainsi, les mo- » difications que l'on observe dans la lumière polarisée transmise » sont dues à la différence de ces causes contraires, ayant des in- » tensités comparables sur les rayons lumineux de diverse réfrangi- » bilité. On a donc, pour la polarisation, un cas analogue à celui » que présentent pour la réfraction ordinaire, deux prismes de même » angle, mais inégalement dispersifs, que l'on superposerait l'un à » l'autre angulairement. Et comme la disposition résultant d'un » pareil assemblage diffère totalement des lois habituelles que suit » ce phénomène dans un seul prisme d'une substance quelconque, » de même l'opposition des forces polarisantes de l'apophylite doit, » selon toute vraisemblance, associer les rayons lumineux iné- » galement réfrangibles sur les directions de polarisation, tout » autrement que ne le font les corps cristallins dans lesquels le » pouvoir de double réfraction moléculaire est seul actif ou prédo- » minant. »

Un cristal d'apophylite pyramidale, dans lequel la lumière polarisée a été transmise suivant son axe, a donné des phénomènes

analogues à l'alun. Ainsi, en tournant le cristal sur son axe, de manière que les plans réfringents des faces latérales coïncident ou soient perpendiculaires avec le plan de polarisation primitif, le rayon polarisé transmis n'éprouvait aucune modification, même en l'étudiant avec le secours de la lame sensible. Dans toute autre position, au contraire, il était modifié, et la portion de lumière enlevée à la polarisation primitive augmentait progressivement avec l'écart, jusqu'au maximum qu'elle atteignait quand les plans réfringents formaient un angle de 45° avec le plan de polarisation. Dans cette position, la projection du cristal observée directement, s'illuminait d'une clarté légèrement bleuâtre, et, avec la lame de chaux sulfatée, elle se voyait partagée par des lignes noires en quatre segments, dont deux opposés étaient rouges, et les deux autres étaient verts. Ce dernier était fortement éclairé, parce qu'un cristal voisin avait empêché le développement complet de cette quatrième face de la pyramide.

Pour rendre évidente l'action de la polarisation lamellaire, menons par l'axe du cristal un plan représenté par la trace LL, qui forme un angle de 45° avec le plan de polarisation primitif, et inclinons peu à peu la plaque suivant ce plan, en la faisant tourner autour d'une ligne normale au plan comme charnière; et pour achever de définir le sens du mouvement, supposons que le segment A s'éloigne aussi de l'œil, tandis que le segment inférieur B s'en rapproche; cela ne changera pas le *sens* de l'action polarisante de ces deux segments, qui restera toujours le même que celui d'une lame à double réfraction attractive, ayant sa section principale perpendiculaire au plan : seulement, l'intensité de cette action croîtra pour A, parce que ces lames constituantes deviendront plus obliques aux rayons transmis, et décroîtra pour B, par la cause contraire. Mais l'obliquité donnée à la plaque aura encore un autre effet, qui sera de développer son pouvoir de polarisation moléculaire, lequel s'exercera dans le plan LL, où l'axe s'incline. Comme ce pouvoir est de nature attractive, il agira en opposition à celui des segments A et B, avec une intensité d'abord très faible, qui croîtra à mesure que l'axe s'inclinera davantage. Enfin ce mouvement développera aussi l'action du système lamellaire normal à l'axe, laquelle s'ajoutera à celle des segments A et B; de sorte qu'il y aura opposition entre leurs sommes et le pouvoir dépendant de l'axe.

Ces considérations théoriques se vérifient complétement : l'éclat des ségments A et B s'affaiblit dès que l'on commence à incliner l'axe ; puis on voit la lumière sur B s'éteindre, et bientôt après celle de A disparait.

M. Biot a imité artificiellement l'action polarisante du tissu lamellaire, en plaçant sur une plaque d'alun, taillée parallèlement à la face de l'octaèdre, une lame mince de mica à un axe attractif; les conditions d'action se sont ainsi trouvées les mêmes, et la succession des apparences optiques a été pareille. Cette dernière expérience nous parait ne laisser aucun doute sur le pouvoir polarisant des lames de l'apophylite. Si l'on se rappelle, en outre, que tous les cristaux de cette substance n'avaient pas offert à M. Brewster l'existence de deux axes, on en conclura naturellement que les échantillons qui affectent cette apparence la doivent à la différence de structure lamelleuse, différence reconnue dans plusieurs substances minérales.

M. Biot termine l'examen des propriétés de l'apophylite, en donnant les dessins remarquables que les cristaux d'apophylite de Féroë présentent, lorsqu'on fait arriver un faisceau de lumière polarisée perpendiculairement aux faces du prisme. La singulière symétrie des lignes d'égale teinte que l'on observe, rappelle celles qui distinguent les verres trempés ; mais la cause en est différente, car la disposition de ces dessins persiste quand on les casse, tandis que pour les verres trempés, les dessins changent avec la forme extérieure des fragments. Il est probable qu'ici encore les deux causes que nous avons signalées, le pouvoir moléculaire de l'axe du cristal et l'action du tissu lamelleux, sont en jeu, et que ce sont elles qui déterminent ces dessins, dont la régularité ne peut être l'effet du hasard.

La seconde des figures de M. Biot avait été donnée, il y a bientôt trente ans, par M. Brewster, dans les *Mémoires de la Société royale d'Edimbourg*. La première est le résultat des observations de M. Biot sur de très petits cristaux venant de Féroë, qu'il a amplifiés au moyen d'une disposition particulière de loupe.

Les belles expériences que nous venons de rapporter introduisent, dit M. Dufresnoy, un élément nouveau dans l'optique des minéraux, qui avait été négligé jusqu'ici. Peut-être les différences qu'on

observe entre les angles des deux axes de double réfraction de quelques substances, notamment dans la topaze et le mica, tiennent-elles à l'action de la polarisation lamellaire, nulle ou du moins plus faible dans une variété que dans une autre.

Peut-être aussi la polarisation lamellaire a-t-elle une influence directe sur la double réfraction attractive et répulsive. M. Biot semble disposé à l'admettre : « L'action de la polarisation, dit-il, » peut accroître l'intensité du pouvoir moléculaire quand il est ré» pulsif, et l'affaiblir quand il est attractif, de manière à en pré» senter une indication inexacte quand on le conclut des seuls phé» nomènes apparents de la polarisation. »

Faut-il réellement conclure de cette longue étude de M. Biot que la superposition des lamelles ou, comme l'appelle M. Biot, le tissu lamelleux exerce une action propre, *sui generis*, un genre nouveau de polarisation spéciale? Nous disons franchement que nous ne le pensons pas. C'est pour nous une conviction profonde que la raison dernière de ces anomalies doit se rapporter à des phénomènes d'imbibition, de trempe, etc., à des croisements de structures cristallographiques différentes, tronquées, incomplètes, etc., etc., à des assemblages en mosaïque de cristaux placés dans des positions variées et arrangées dans un ordre très complexe, quoique très symétriques, etc., etc.

Polarisation circulaire.

M. Arago a découvert le premier le fait imprévu, que la couleur qui est au centre des anneaux colorés d'une plaque de quartz soumise à l'action de la tourmaline change de teinte lorsque l'on imprime à la plaque un mouvement de rotation. Un rayon polarisé, que nous supposerons d'abord être le rayon jaune moyen transmis le long de l'axe de ce cristal, est toujours coloré, et donne naissance, si on l'analyse à l'aide du prisme biréfringent, à deux images colorées de teintes complémentaires, tandis que pour les autres cristaux à un axe, l'une des deux images est simplement blanche et l'autre noire. Les teintes des images dans le cristal de roche montent et descendent dans la table de Newton à mesure qu'on tourne le prisme, de sorte que si l'image extraordinaire était rouge, elle

devient successivement orangée, jaune, verte et violette. Lorsqu'on place une plaque très mince dans un appareil convenable, et qu'on fait tourner le prisme jusqu'à ce que l'image extraordinaire ait un éclat minimum, celle-ci prendra dans cette position une teinte violette ou pourpre sombre, parce que les rayons jaunes, c'est-à-dire les plus lumineux qui forment le complément des rayons violets, sont entièrement éteints. Ayant observé l'angle de rotation du prisme, au moyen d'un cercle gradué, on enlève cette première lame, et on lui en substitue une autre du même cristal, mais d'une épaisseur double: alors la teinte cesse d'être violette; mais si l'on fait tourner le prisme d'une quantité angulaire égale dans le même sens, la teinte violette ou pourpre reparaît et correspond au minimum d'éclat. En général, l'arc qui mesure l'angle de rotation du prisme correspondant au minimum d'intensité et à la teinte pourpre de l'image extraordinaire, croît en raison directe de l'épaisseur des lames, que nous supposons provenir toutes du même cristal. Cette expérience établit ce fait, que le plan de polarisation du rayon jaune-moyen qui a traversé l'axe d'une lame de quartz, s'écarte de la position primitive d'une quantité proportionnelle à l'épaisseur de la lame, et qu'il prend au moment de l'émergence la position dans laquelle il se trouverait, si on l'avait fait tourner uniformément dans le même sens pendant le trajet du rayon au travers de la lame. Le même raisonnement peut s'appliquer à tous les autres rayons homogènes. Si l'on se sert du rouge, par exemple, ou qu'on place devant l'œil un vert d'un rouge pur, on observe les mêmes phénomènes: seulement, au lieu d'une teinte violette correspondante au minimum de lumière, on obtiendra une oblitération totale des faisceaux extraordinaires, lorsque le prisme aura obtenu la position convenable, ce qui prouve jusqu'à l'évidence la polarisation complète du rayon émergent qu'on ne pouvait conclure de l'autre expérience.

En examinant de cette manière la quantité dont une même lame de quartz fait dévier les plans de polarisation des divers rayons homogènes, M. Biot a reconnu que l'action est d'autant plus énergique que les rayons sont plus réfrangibles, et que l'écart des plans de polarisation croît en conséquence. Suivant cet habile physicien, le coefficient constant ou l'indice qui représente la vitesse que l'on

peut attribuer au plan de polarisation est proportionnel au carré de la longueur d'ondulation du rayon homogène que l'on considère.

M. Biot a fait la découverte singulière d'une différence constante que l'on remarque dans différentes espèces de cristal de roche, relativement au sens dans lequel se fait la rotation, ou le changement angulaire du plan de polarisation. Tout se passe dans cetains échantillons appelés dextro-gyres, comme si le plan de polarisation tournait vers la droite; dans les autres, comme si ce même plan tournait vers la gauche. Lorsque ces deux sortes de cristaux sont taillés et polis de manière que les indications de la forme cristalline se trouvent effacées, on ne peut plus les distinguer entre eux par aucun autre caractère. Mais M. Herschell a été conduit par induction à une loi très singulière qui lie le sens de la rotation aux particularités de la forme cristalline de l'échantillon que l'on considère. Certains cristaux de quartz portent des faces trapéziennes placées sur les angles compris entre les faces du prisme et les faces de la pyramide. Ces faces, que Haüy a appelées plagièdres, devraient être doubles, et ne sont jamais que simples : seulement, certains cristaux portent le plagièdre incliné à droite, tandis que d'autres le portent incliné à gauche. Or, quelle que soit la cause déterminant le sens de la rotation, elle est la même que celle qui détermine la direction des faces plagiédrales. La rotation vers la droite accompagne toujours les faces plagiédrales inclinées de gauche à droite; la rotation vers la gauche accompagne toujours les faces plagiédrales inclinées de droite à gauche.

M. Dufresnoy, généralisant ce fait, arrive à cette conclusion, que la dissymétrie est toujours occasionnée par une propriété physique particulière; on dirait, ce me semble, avec plus de vérité que la dissymétrie, qui accuse l'action d'une force anormale ou accidentelle, analogue, par exemple, à la compression exercée dans un certain sens, etc., devait entraîner comme conséquence naturelle une propriété physique additionnelle. Ainsi s'expliquerait l'électricité polaire de certains cristaux dissymétriques de tourmaline, de boracite, etc.

D'autres minéraux que le quartz, l'apatite, par exemple, etc., offrent aussi des faces plagiédrales non symétriques. Mais outre leur extrême rareté et parce que ces cristaux ne présentent pas la

polarisation circulaire, on n'a pas pu mettre en évidence les phénomènes physiques qui pourraient naître de cette dissymétrie.

La polarisation circulaire donne le moyen de reconnaître les hémitropies et les pénétrations fréquentes de cristaux qu'aucune strie extérieure ne révèle. Les plaques qui les contiennent présentent des couleurs variées dont les contours indiquent les limites des cristaux qui les pénètrent.

M. Soleil a découvert le premier des plaques de cristal de roche qui dans des points très voisins présentaient des rotations de sens contraire.

Quand deux lames de cristal de roche sont superposées, si elles sont toutes deux dextrogyres ou lévogyres, leur effet collectif quant à la rotation est égal à la somme des effets individuels, c'est-à-dire que le plan de polarisation de chaque rayon sera dévié sous un angle égal à la somme des écarts dus à chaque lame en particulier. Si les lames sont de caractère opposé, au lieu de la somme, il faut prendre la différence, c'est-à-dire que si l'indice de rotation est regardé comme positif dans un cristal dextogyre, il doit être considéré comme négatif dans le cristal lévogyre. Lorsque les épaisseurs des deux plaques sont égales, les effets se détruisent; on voit apparaître le système d'anneaux avec la croix noire.

L'améthyste (et peut-être aussi dans certains cas l'agate) ont offert à M. Brewster le phénomène remarquable de ces deux espèces de quartz cristallisés ensemble en couches alternatives extrêmement minces. Ces couches ne sont pas unies comme les parties de certains cristaux composés, dont les faces semblables se touchent mécaniquement. Elles se dépassent mutuellement à la surface de fracture d'un morceau fraîchement rompu, et y produisent ces ondulations singulières qui forment le caractère principal servant à distinguer ce minéral du quartz ordinaire.

M. Rose a publié récemment, dans les *Annales de Pogendorff* plusieurs mémoires sur le mode de cristallisation du cristal de roche. Il nous a semblé que tout ce que ces divers travaux renfermaient de neuf pouvait se résumer dans les observations suivantes : 1° La formation jumelle se rencontre très fréquemment dans le quartz le plan de jonction ou de soudure est la face plane terminale, et l'axe de rotation du système est parallèle à l'axe principal. Les cristaux ju-

meaux sont ou juxtaposés ou croisés ; tantôt ils se distinguent nettement par des angles rentrants ; tantôt ce caractère manque, et le cristal composé, prenant l'apparence d'un cristal simple, se reconnait difficilement. Souvent, cependant, les faces rhomboédriques se distinguent par une différenee d'éclat qui fait ressortir encore le groupement des deux individus. Si les cristaux unis étaient parfaitement réguliers et si leur plan de jonction passait précisément par les arêtes latérales diamétrales, l'un des sommets ne présenterait que les faces du rhomboèdre principal, et l'autre celles du rhomboèdre opposé, c'est-à-dire que l'un des sommets serait terminé par une pyramide hexagonale à faces brillantes, et l'autre par une semblable pyramide à faces mates. Si de plus, comme cela arrive ordinairement, les deux cristaux étaient juxtaposés, leur ensemble ne se distinguerait plus d'un cristal simple ; mais les limites des cristaux ne sont jamais si absolument régulières, de sorte que les cristaux jumeaux sont en général facilement reconnaissables. Ce genre de formation se rencontre surtout en Suisse ; les cristaux unis sont toujours juxtaposés ; le sommet libre présente constamment des faces polies ou brillantes. M. Rose n'a jamais vu l'autre sommet bien déterminé.

Ce qu'il y a de plus essentiel à observer, dit M. Rose, c'est que tous les cristaux jumeaux sont la réunion de deux individus droits ou de deux individus gauches. Il parait comme impossible de trouver un cristal jumeau composé de deux cristaux de rotations contraires. Il en résulte que si MM. Brewster et Dove ont cru reconnaitre que des améthystes et des cristaux de roche avec des faces en partie mates et en partie brillantes, se comportaient dans leurs propriétés optiques comme une réunion de deux cristaux tournant l'un à droite, l'autre à gauche, ce résultat n'est pas d'accord avec les recherches cristallographiques de M. Rose.

M. Biot croit encore que cette propriété remarquable du quartz réside dans les dernières molécules et les accompagne dans toutes leurs combinaisons. Cette opinion est repoussée par MM. Brewster et Herschell, qui n'ont rencontré la polarisation circulaire ni dans l'opale, ni dans le tabasheer ou d'autres corps siliceux, ni dans le quartz fondu, ni enfin dans la dissolution de silice dans la potasse. Nous hasarderons à ce sujet quelques réflexions qui nous sont sug-

gérées par une note récente de M. Mitscherlich, et qui complèteront ce que nous avons déjà dit du pouvoir rotatoire des solides ou des fluides.

On savait que l'acide tartrique possède le pouvoir rotatoire et le communique à toutes ses combinaisons salines avec des modifications qui affectent seulement l'énergie absolue de son action et la loi des dispersions éprouvées par les plans de polarisation des différents rayons simples. L'acide paratartrique, au contraire, quoique ayant la même composition pondérale, ne possède pas ce pouvoir, et ne le communique à aucune de ses combinaisons salines. M. Mitscherlich s'est proposé d'examiner si cette opposition se maintiendrait dans des circonstances où les deux corps comparés seraient semblables non seulement par la composition chimique, mais encore par la forme cristalline et les propriétés physiques. Il a trouvé ces conditions réunies avec une remarquable identité dans les sels doubles formés par ces deux acides avec la soude et l'ammoniaque. Le paratartrate et le tartrate doubles de soude et d'ammoniaque ont la même composition chimique, la même forme cristalline, avec les mêmes angles, le même poids spécifique, la même double réfraction, et par conséquent les mêmes angles entre les axes optiques. Dissous dans l'eau, leur réfraction est la même; mais le tartrate dissous tourne le plan de la lumière polarisée, et le paratartrate est indifférent. Comment ce résultat s'explique-t-il, puisqu'ici la nature et le nombre des atomes, leur arrangement et leurs distances sont les mêmes dans les corps comparés. M. Biot nie cette identité complète, qui ne peut être suffisamment constatée, dit-il, ni par l'analyse chimique, ni par la forme cristalline, ni par les phénomènes de la réfraction simple ou double, etc. Suivant ce savant, les seuls phénomènes dont l'observation et les mesures puissent être légitimement rapportées aux groupes moléculaires constituant eux-mêmes, consistent précisément dans les déviations qu'un certain nombre de substances impriment aux plans de polarisation des rayons lumineux. L'acide tartrique et l'acide paratartrique, les tartrates et les paratartrates, quoique parfaitement semblables, tant par leurs poids atomiques que par toutes les propriétés physiques appartenant aux masses complexes, que par leurs propriétés chimiques essentielles, agissent diversement sur les plans de pola-

risation des rayons lumineux ; le *pouvoir moléculaire spécifique* de la seconde classe de corps est nul, tandis que ce même pouvoir a une valeur très appréciable pour la première : donc ces corps sont essentiellement formés de molécules dissemblablement placées. Oserons-nous dire que les opinions si contradictoires en apparence de ces deux hommes éminents ne sont point inconciliables? Nous sera-t-il permis d'exprimer en tremblant une pensée qui suffit seule, nous le croyons, à expliquer un très grand nombre d'anomalies? N'est-il pas possible, n'est-il pas probable que la différence d'action des solutions de tartrate et de paratartrate de soude et d'ammoniaque, ainsi que les différences semblables présentées par une même substance dans des états d'agrégation différents, doive être attribuée uniquement aux proportions différentes de fluide impondérable qui en font partie, aux quantités diverses de fluide calorifique ou lumineux qu'ils retiennent en combinaison, et dont l'analyse chimique fait abstraction parce que ces fluides échappent à ses réactifs et à ses balances? Des recherches déjà nombreuses et appuyées d'un grand nombre de faits établissent qu'un même corps peut offrir successivement des propriétés physiques réellement différentes, parce qu'il renferme successivement à l'état de combinaison une plus ou moins grande quantité de calorique. On a vu une substance impondérable s'unir avec les éléments des corps en proportions définies : pourquoi dès lors des substances parfaitement isomères, comme les deux sels de M. Mitscherlich, ne différaient-ils pas entre elles, ainsi que les corps dimorphes, par l'addition ou la soustraction de l'un des fluides impondérables connu? Leur différence d'action sur la lumière sera alors tout-à-fait naturelle.

Pour ne rappeler ici qu'un fait, l'acide arsénieux vitreux et l'acide arsénieux opaque ont, suivant M. Dumas, la même composition chimique : or, si l'on fait cristalliser dans un lieu obscur deux solutions concentrées de ces deux acides dans l'acide chlorhydrique, la solution d'acide opaque ne présentera aucun phénomène particulier, tandis que celle d'acide vitreux donnera naissance à un dégagement considérable de lumière. En résumé, les fluides impondérables à l'état libre ou latent jouent évidemment un grand rôle dans la formation et la constitution intime ou moléculaire des corps. Dans le cas le plus simple, une certaine quantité de ces fluides peut être sim-

plement interposée entre les molécules retenues par les forces d'attraction qui déterminent leur agrégation, et cette quantité peut varier suivant l'état actuel solide, liquide, gazeux, du corps, suivant le liquide dans lequel il est dissous. Dans d'autres circonstances, ces corps impondérables peuvent jouer réellement le rôle de l'eau dans les hydrates, s'unir aux atomes pondérables en proportions définies, et entrer dans l'essence même de la molécule constituante. Quelquefois le phénomène est encore plus simple : les molécules des corps, en cédant à la cohésion ou à l'affinité, en se groupant par un mouvement rapide, vibrent et communiquent aux molécules d'éther des vibrations rapides, intenses, productives de chaleur, de lumière, d'électricité. Or, il est évident que la quantité de fluide impondérable simplement interposée entre les molécules ou combinée avec les atomes, doit être prise en considération quand il s'agit d'apprécier l'action exercée par le corps dont il s'agit sur la chaleur, la lumière, l'électricité, etc., parce qu'elle est apte à modifier l'effet produit dans sa nature ou dans son intensité. Cette simple réflexion suffit, il nous semble, pour résoudre toutes les difficultés soulevées jusqu'à ce jour.

Nous rappellerons ici, sans les rattacher plus étroitement à ce qui précède, les faits suivants, qui ne sont pas sans importance, et qui ont été découverts par M. Babinet.

I. La variété de quartz-résinite qui porte le nom de hyalite, et qui est parfaitement transparente, étant taillée en plaque à faces parallèles, et interposée dans *un sens* quelconque, entre deux tourmalines croisées, dépolarise complétement la lumière, en quoi elle diffère des autres variétés de quartz-résinite, et notamment de l'opale laiteuse, à reflets orangés, et l'opale de feu du Mexique.

II. Si l'on *égrise* du cristal de roche, c'est-à-dire si on le réduit en poussière en frottant deux aiguilles l'une contre l'autre, et qu'on mette cette poudre dans de l'huile pour lui rendre de la transparence, le mélange ne produit point la rotation, mais il dépolarise complétement la lumière qui le traverse. On obtient, du reste, le même résultat avec du verre pilé.

III. Enfin, si l'on met du verre pilé dans l'huile, ou mieux encore du spath-fluor, dont la réfraction est des plus faibles parmi celles des corps solides, et qu'on en forme, entre deux verres plans, une

plaque à faces parallèles, cette plaque, traversée par la lumière polarisée, manifeste la curieuse propriété de ne dépolariser que les rayons dont la réfraction diffère dans le spath et dans l'huile; en sorte que la lumière émergente, analysée par la double réfraction, donne des couleurs très remarquables, et qui, de plus, ont la propriété de varier rapidement avec la température du système, à cause de l'inégalité d'influence que la chaleur exerce sur le solide et sur le liquide.

Pouvoir dispersif.

Les pouvoirs dispersifs des corps fournissent encore un caractère distinctif d'un haut intérêt. En observant avec attention les spectres formés par des prismes de diverses substances, on reconnaît bientôt que les diverses couleurs, quoique rangées toujours dans le même ordre, n'occupent pas cependant des longueurs proportionnelles. Ainsi un prisme de flint, par exemple, donne proportionnellement moins de rouge et plus de violet qu'un prisme de crown, et il y a d'autres substances qui offrent des différences encore plus frappantes. En général, la même couleur est tantôt plus ou moins resserrée, tantôt plus ou moins développée. Ce phénomène se trouve évidemment lié avec les grandeurs des indices de réfraction. Si l'on prend la différence de ces indices pour les rayons extrêmes, le violet et le rouge, on aura ce qu'on appelle la dispersion totale de la lumière. Une substance est d'autant plus réfringente que pour elle cette différence est plus grande. La différence entre les indices de réfraction correspondants à une couleur particulière donne la dispersion partielle relative à cette couleur.

Lorsqu'on divise la dispersion totale ou partielle d'une substance par la dispersion correspondante d'une autre substance, on a le rapport des dispersions.

Le pouvoir dispersif d'une substance est le quotient que l'on obtient en divisant sa dispersion par son indice moyen de réfraction diminué de l'unité. On appelle indice moyen de réfraction celui qui appartient à la lumière moyenne du spectre ou à la raie *e* de Frauenhofer.

La dispersion et le pouvoir dispersif varient considérablement quand on passe d'une substance à l'autre. Ainsi le pouvoir dispersif,

qui est 0,400 pour le chromate de plomb, 0,060 pour le sulfate de plomb, 0,053 pour le sel gemme, 0,046 pour le cabonate de strontiane, 0,040 pour le spath calcaire, 0,037 pour le béryl, 0028 pour la tourmaline, n'est plus que 0,022 pour le spath fluor.

En général, une grande puissance réfractive est accompagnée d'un pouvoir dispersif énergique; mais les exceptions sont innombrables, surtout pour les pierres précieuses, entre lesquelles on distingue le diamant.

Certains corps paraissent communiquer leur pouvoir réfringent et dispersif à leurs composés; d'autres corps, le fluor, et même l'oxigène, par exemple, semblent n'avoir qu'une très faible influence sur les pouvoirs dispersifs de leurs composés; l'hydrogène, le soufre et surtout le plomb paraissent exercer une très grande influence en sens contraire. Les pouvoirs dispersifs et réfringents sont quelquefois indépendants l'un de l'autre: on peut, dans des circonstances données et par un mélange convenablement choisi, diminuer la dispersion de moitié, sans que la réfraction subisse un changement appréciable.

On admettait, avant M. Amici, que la dispersion des couleurs est constante pour un même milieu réfringent, c'est-à-dire qu'à des réfractions égales pour la même substance, correspondaient des dispersions égales, et l'on en concluait qu'il était impossible de détourner la lumière par réfraction sans la décomposer, en n'employant qu'une seule substance diaphane. L'illustre physicien de Florence a reconnu que la dispersion qui résulte de plus d'une réfraction n'est aucunement constante, mais qu'elle varie avec les inclinaisons des rayons qui tombent sur la face du prisme. Des expériences nombreuses lui ont révélé cette propriété inconnue avant lui, que si le rayon incident, comparé au rayon qui a subi la déviation minimum, pénètre du côté de l'arête du prisme, la dispersion sera plus forte que celle qu'on obtient en faisant tourner le prisme de manière à produire la même réfraction, en faisant pénétrer le rayon incident vers la base, et non plus vers l'arête. Ce qui semble plus étrange encore, c'est qu'un rayon sorti du premier prisme se modifie de manière à acquérir la propriété contraire, c'est-à-dire qu'en recevant sur un second prisme le rayon sorti du premier, la dispersion des couleurs est plus grande

quand le rayon s'approche de la base, moins grande quand il s'approche de l'arête. Sous une autre forme, quand des déviations égales du spectre sont dues à des déviations inégales des rayons par les deux faces d'un prisme, les espaces colorés sont plus grands lorsque la déviation par la face postérieure est plus grande que celle qui provient de la face antérieure. Cette proposition n'est vraie qu'à la condition que le rayon incident n'ait point éprouvé de réfraction antérieure, autrement les espaces sont plus resserrés. Ces faits, ignorés avant la découverte de M. Amici, et qui semblaient en contradiction avec les théories reçues, ne sont cependant que de simples corollaires des lois ordinaires de la réfraction et de la dispersion. Ces lois suffisent à prouver que la réfraction achromatique n'exige pas absolument plus d'une substance réfringente.

Absorption sans polarisation.

Toute substance non cristallisée, et, parmi les cristaux, tout cristal simplement réfringent, ne transmet que la lumière neutre; et généralement, d'après M. Arago, toute extinction ou absorption de lumière ou de couleurs, non accompagnée de double réfraction, porte également sur les deux faisceaux polarisés en sens contraire, dont on peut supposer que toute lumière naturelle ou neutre est composée. Il ne s'agit donc ici que de l'absorption de telle ou telle couleur de préférence par une substance minérale colorée ou non colorée.

On peut citer pour type de cette absorption celle qui a lieu dans les verres colorés. Pour l'observer, on emploiera les procédés suivants : 1° deux faces non parallèles du minéral forment un prisme au travers duquel on regarde la flamme d'une bougie. Par exemple, avec le rubis (corindon), l'extrémité violette du spectre sera supprimée, mais elle ne le sera pas avec le grenat ; 2° illuminez le minéral avec la lumière monochromatique de l'alcool versé sur du sel ordinaire, le rubis sera presque noir, et le grenat réfléchira encore une quantité notable de cette lumière jaune, qui correspond à la raie D de Fraunhofer, dans le spectre solaire; ou bien mettez l'échantillon sous la lumière d'un verre rouge, ou même observez-le avec le verre rouge placé devant l'œil. Enfin, si vous avez à

votre disposition un spectre solaire dans une chambre obscure, promenez le minéral dans diverses nuances. Le saphir, la cordiérite (dichroïte), le disthène et la topaze bleue du Brésil ne se ressemblent plus alors, pour la teinte réfléchie ou transmise. Dans quelques cas, et notamment avec le rubis, on peut faire une expérience analogue à la suivante : regardez la flamme assez brillante de l'alcool salé avec une plaque liquide de sulfate de chrome, comprise entre deux verres plans, et cette flamme sera complétement invisible.

Absorption avec polarisation.

Tout cristal biréfringent coloré absorbe inégalement les deux faisceaux polarisés de la lumière neutre. Certains cristaux de tourmaline, de cordiérite, d'épidote, ne transmettent même que de la lumière polarisée. M. Babinet a communiqué depuis plusieurs années à l'Académie cette loi qui admet peu d'exceptions, savoir, que les cristaux biréfringents colorés, dits répulsifs ou négatifs, comme le spath coloré, la tourmaline, le corindon, laissent passer en plus grande abondance le faisceau extraordinaire, tandis que les cristaux dits positifs ou attractifs, comme le quartz enfumé, le zircon, le gypse, transmettent en excès la lumière ordinaire. Ainsi, pour chaque espèce minérale, ou même pour chaque variété, la nature de la lumière transmise devrait être observée et notée ainsi que l'intensité de l'action polarisante. Par exemple, des amphiboles, des topazes bleues, parfaitement semblables pour la couleur, le poli, l'aspect, l'éclat, à des tourmalines polarisant complétement, ne donnent elles-mêmes qu'une très faible polarisation.

Dichroïsme, polychroïsme.

Tout cristal qui polarise complétement la lumière, l'éteint aussi complétement suivant son axe ou suivant ses axes. Mais on remarque que pour une certaine couleur simple ou composée, plusieurs cristaux ne jouissent pas de la propriété polarisante et de la propriété d'absorption complète suivant l'axe. La tourmaline rouge, le rubis, laissent passer des rayons rouges non polarisés, et si l'on croise deux tourmalines rouges, cette même teinte se fait jour au travers du système, et les anneaux de spath interposé sont tra-

versés par une croix rouge au lieu d'une croix noire qui aurait été produite avec deux tourmalines complétement polarisantes : aussi, dans l'appareil de M. Herschell, les deux tourmalines que l'on veut croiser doivent être de teinte différente. Avec l'émeraude, les bandes noires du polariscope de M. Savart sont vertes; elles sont bleues avec l'aigue-marine et le saphir; elles sont rouges avec la sibérite et le rubis, et manquent complétement quand on examine de la même manière le grenat et le spinelle.

On peut donc formuler comme il suit l'effet du dichroïsme : suivant l'axe ou les axes d'un cristal coloré biréfringent, on n'a que la couleur non soumise au *tamisage* polarisateur du cristal, si l'on peut se servir de cette expression, et *cette couleur n'est pas polarisée*, comme M. Babinet l'a très soigneusement observé, tandis que suivant toute autre direction il se mêle à cette couleur non polarisée qui passe dans tous les sens, la lumière ou teinte polarisée plus ou moins abondante que laisse passer l'action de l'axe ou des axes, en sorte que si, par un procédé convenable de polarisation, on supprime celle-ci, on retrouve dans toutes les directions la même teinte que suivant l'axe.

Les teintes ne sont pas toujours nettement tranchées; mais lorsqu'elles le sont, on trouve ici un moyen de déterminer la direction des axes; il suffit de chercher quelle est la direction où, à la vue simple, on observe la teinte semblable à celle qu'on obtient au moyen de la tourmaline analysante.

On explique facilement par ce principe la coloration singulière observée par M. Brewster autour des axes de la cordiérite, autrement appelée dichroïte, iolite, saphir d'eau. M. Babinet a fait tailler en sphère parfaite un très beau cristal de cette substance, qui dans un sens était du plus beau bleu de saphir, et dans l'autre d'un blanc jaunâtre mal défini. En observant cette sphère à la lumière ordinaire, on aperçoit deux taches bleues aux deux extrémités des axes, et suivant toute autre direction il venait se mêler à cette teinte bleue une proportion plus ou moins grande de la lumière polarisée suivant la loi de M. Biot pour les cristaux bi-axes qui laissent passer les axes.

On voit donc que ces mélanges en proportions variables doivent offrir des teintes multiples dont on n'a jusqu'ici noté que les ex-

trêmes, qui ont lieu suivant les axes et suivant une direction perpendiculaire au plan de ceux-ci : c'est un véritable polychroïsme et non un dichroïsme, comme on le dit ordinairement.

L'absorption des milieux colorés biréfringents diffère essentiellement du phénomène ordinaire auquel se rapportent les couleurs propres des corps. Là, comme dans beaucoup d'autres parties de l'optique moderne, les premières observations, celles qui constituent la découverte, sont dues à M. Arago. Il fit voir que, dans les milieux colorés biréfringents, et notamment dans le sulfate jaune de baryte, la lumière polarisée développait des teintes variables, suivant le sens où elle traversait le cristal. M. Biot et M. Brewster, mais surtout M. Biot, étudièrent ensuite le phénomène, mais sans en formuler la loi définitive. M. Babinet avait annoncé que les cristaux colorés biréfringents, dits *négatifs* ou répulsifs, comme le spath d'Islande, la tourmaline, le saphir, absorbent en plus grande abondance le rayon ordinaire, tandis que les cristaux dits positifs ou attractifs, comme le quartz, le zircon, l'apophyllite ordinaire, éteignent en plus grande partie le rayon extraordinaire, et laissent par conséquent passer de la lumière partiellement polarisée, comme le rayon ordinaire. Il y a cependant quelques exceptions, comme pour le béryl, mais non pour l'émeraude.

Plus généralement, tout cristal biréfringent coloré, éclairé par la lumière neutre, peut être considéré comme donnant passage à une certaine quantité de lumière colorée non polarisée, laquelle passe librement dans tous les sens, indépendamment de son axe ou de ses axes optiques, et par rapport à cette lumière, il est analogue à tout autre milieu coloré; et, de plus, à une certaine quantité de lumière polarisée suivant la loi de M. Biot pour les cristaux bi-axes. Cette dernière quantité étant nécessairement variable quand on transmet de la lumière polarisée au travers du cristal, ou quand on analyse la lumière transmise avec un appareil biréfringent, il en résulte, quand cette lumière variable est elle-même colorée, une série nombreuse de nuances, depuis celle où la lumière non polarisée passe seule par l'extinction de la lumière polarisée, jusqu'à la nuance formée de l'ensemble de la lumière non polarisée et de la lumière polarisée tout entière. Ces deux cas extrêmes ont été seuls notés, sous le nom de dichroïsme; mais réellement les cristaux co-

lorés biréfringents à un ou à deux axes sont polychroïtes, et la règle suivante donnera la teinte d'un cristal quelconque.

Prenez la teinte de la lumière non polarisée que transmet ce cristal en tous sens, et la teinte variable suivant la direction de l'axe ou des axes qu'il transmet dans la direction donnée et pour l'azimut donné, et la teinte résultante d'après les formules ordinaires de mélanges de couleurs, sera la couleur actuelle du cristal : c'est ce qui résulte de quelques unes des expériences exposées en détail dans le mémoire de M. Babinet.

Caractères analogues aux phénomènes de réseaux. — Astéries. — Couronnes. — Cercle parhélique.

On connaissait depuis longtemps un phénomène particulier du saphir qui montrait par réflexion, devant une vive lumière, une étoile brillante à six rayons. Plus tard, on s'aperçut que le même phénomène avait lieu par réfraction, en regardant la lumière d'une bougie à travers la pierre. On vit ensuite que plusieurs autres substances donnaient également des étoiles, mais à branches plus ou moins nombreuses. M. Babinet a rattaché ces phénomènes à ceux des réseaux, dont voici les faits analogues.

Lorsqu'on a une série de fils tendus parallèlement et assez près l'un de l'autre, ou bien des stries parallèles tracées sur un verre, et qu'on regarde la lumière d'une bougie à travers ce système, on voit des deux côtés de la flamme une bande lumineuse perpendiculaire à la direction des stries. Quand on a des fils ou des stries croisés à angles droits, on aperçoit deux bandes lumineuses croisées de même, et par conséquent une étoile à quatre rayons rectangulaires : c'est ce qu'on peut voir en regardant la lumière à travers un linge fin, ou à travers une lame de verre, un simple verre de lunette, sur laquelle on a passé le doigt légèrement humide dans deux directions à angle droit. Avec trois séries de fils ou de stries, on a trois bandes, et par conséquent une étoile à six rayons. Généralement, il y a autant de bandes lumineuses que de directions de stries, et les angles des bandes entre elles sont précisément ceux des stries elles-mêmes. Tous ces effets dépendent de la réflexion de la lumière à la surface des fils ou des stries.

Les astéries s'expliquent donc par l'existence de petites fibres ou solutions de continuité disposées dans le saphir parallèment aux intersections des faces du prisme hexaèdre avec les bases de ce prisme, qui, contrairement au prisme du quartz, est souvent terminé par des faces ou bases perpendiculaires aux arêtes du prisme, montrant aussi une disposition moléculaire dont le résultat doit être une série de lignes ou de stries parallèles entre elles, et aux arêtes de la base du prisme suivant trois directions diverses. Sur plusieurs saphirs on distingue au grand soleil deux ou même trois de ces systèmes de stries. La lumière qu'elles reflètent transversalement donne une étoile à six rayons qui doivent aboutir au milieu des faces du prisme, comme on l'observe en effet; et si l'on taille une lame de saphir et qu'on regarde une bougie au travers, on aperçoit, quelle que soit la place de l'œil, contrairement à l'explication d'Haüy, une étoile à six branches dont la lumière est le centre. Si cette théorie est vraie, en coupant le saphir-astérie perpendiculairement à l'un ou l'autre des systèmes de stries parallèles, on doit obtenir un cercle parhélique : c'est ce que M. Babinet a vérifié en sacrifiant de très belles astéries de saphir. On doit en dire autant de l'astérie du rubis, qui n'est seulement qu'une autre couleur du corindon. Les astéries ne sont pas de la même teinte que le fond de la couleur de la pierre, comme cela doit être, puisqu'elles sont une réflexion spéculaire de la lumière transmise.

Des structures semblables dans les minéraux à celles des réseaux produisent les mêmes effets. Cela nous explique le chatoiement de certaines substances par réflexion, car toutes les substances chatoyantes sont fibreuses, à fibres plus ou moins fines, et c'est perpendiculairement à ces fibres que se montre la ligne du reflet lumineux qui la fait remarquer. Le gypse et le carbonate de chaux fibreux, le quartz fibreux, le quartz asbestifère (œil-de-chat), présentent ces effets d'une manière saillante.

En examinant au microscope les corps astérisants, on y découvre le plus souvent les structures correspondantes. Ainsi, une plaque coupée perpendiculairement à l'axe dans un prisme hexagone de saphir, ou dans un dodécaèdre pyramidal à triangles isocèles présente des stries qui forment entre elles des triangles équilatéraux : elles doivent donc donner des étoiles à six rayons :

un prisme d'émeraude est dans le même cas. Un prisme carré d'idocrase présente sur ses bases, au microscope, des lignes rectangulaires, et il donne en effet des étoiles à quatre rayons rectangulaires. Un prisme de sulfate de baryte présente deux systèmes de lignes qui se croisent obliquement, et il produit une astérie à quatre branches qui se croisent de même.

L'œil-de-chat ne contient qu'une seule ligne de filaments qui sont de l'asbeste : aussi ne donne-t-il qu'une ligne lumineuse transversale aux filaments ; et si on le taille perpendiculairement à ceux-ci, on a un cercle parhélique.

L'espèce d'astérisme que présente une substance peut donc nous donner sur sa structure intérieure des indices qui nous échappent de toute autre manière. Ainsi, on doit conclure que les prismes hexagones de saphir et d'émeraude sont formés de prismes triangulaires équilatéraux ; que les prismes d'idocrase sont formés de prismes carrés, et que les prismes de sulfate de baryte sont formés de prismes rhomboïdaux. Ce qui prouve, en effet, qu'il en est ainsi, c'est qu'une plaque coupée dans un corps parallèlement à l'axe ne produit qu'une seule ligne lumineuse, ou tout au plus deux lignes rectangulaires, dont l'une correspond aux clivages de la base.

Les observations, en se multipliant, nous donneront sans doute des résultats importants, et l'on verra probablement pourquoi certaines substances, le quartz, par exemple, malgré leur analogie avec d'autres, ne produisent pas d'astérismes. On déterminera la forme et la disposition des molécules qui conviennent au grenat trapézoèdre pour produire des étoiles à six ou à quatre rayons. On saura pourquoi il n'en est pas de même dans d'autres substances du système cubique.

Tous les chatoiements superficiels, tels que ceux du corindon harmophane, de l'hyperstène, du labrador, de la nacre de perle, sont des phénomènes de réseaux. Les phénomènes de transmission de la nacre de perle, de l'agate irisée à couleurs récurrentes, sont aussi du même genre. On ne parle pas ici des reflets intérieurs de la nacre, de l'opale, de la pierre de lune, de la cymophane, dont on n'a pas l'explication. Quant aux chatoiements de surface et à ceux de transmission, les couleurs efficaces sont d'autant plus distantes du rayon réfléchi ou transmis régulièrement que les lames ou les

stries de la substance sont plus fines. M. Babinet a vu de beaux échantillons d'agate dont les couches sont espacées par soixantièmes de millimètres. Les couches de la nacre ne sont pas distantes de plus d'un centième de millimètre. Enfin, dans l'hyperstène et dans le labrador, la distance est encore beaucoup moindre, en sorte que les couleurs reflétées sont encore plus loin de la lumière directe et d'une teinte moins variable. C'est aussi le secret des singulières couleurs du colibri, qui ne sont visibles que presque à l'opposite de la direction de la lumière incidente. On sait que, dans ce cas, et sous l'incidence perpendiculaire, le produit de la distance des couches ou des stries par le sinus de l'angle de déviation de la couleur transmise est égal à l'intervalle fondamental des interférences. Soit a la distance de deux raies ou stries, δ l'angle de déviation, et λ l'intervalle fondamental des interférences, on a :

$$\delta \sin a = \lambda.$$

Quant aux phénomènes analogues aux couronnes, on sait que si plusieurs fils égaux d'un diamètre d sont interposés entre l'œil et une bougie, on voit autour de celle-ci une ou plusieurs couronnes.

Dès lors, quand une substance minérale est composée uniformément de fibres régulières parallèles, et qu'on taille des plaques perpendiculairement à leur direction, on voit à travers ces plaques un ou plusieurs anneaux circulaires, entourant la lumière qu'on prend pour point de mire. Les couronnes sont plus ou moins grandes suivant la grosseur des fibres, qu'on peut parvenir à évaluer rigoureusement par la mesure du diamètre des cercles.

La distance angulaire d de chaque point de la circonférence du premier anneau ou couronne à la bougie est donnée par l'équation

$$d \sin a = \frac{1}{2} \lambda.$$

Les autres anneaux ou couronnes ont des distances à la bougie qui sont successivement doubles, triples, quadruples de la distance de la première. Ceci peut servir à mesurer la grosseur des fibres ou cristaux élémentaires dans les cristaux fibreux, et indiquer en même temps si ces petits cristaux ou fibres sont de dimensions uniformes. Ainsi, avec le quartz œil-de-chat qui contient des filaments d'a-

miante, avec le béryl, avec l'asbeste fibreux compacte, on ne voit point de couronne, parce que les filaments n'ont point une dimension égale ; mais avec le gypse fibreux, le quartz fibreux, le diopside, la witherite, la crokidolite, la couronne se voit et se mesure. Dans la première de ces espèces, les fibres sont de un trentième à un quarantième de millimètre, et dans les échantillons les plus beaux, on pourrait exactement en fixer le diamètre en se servant de la lumière homogène d'alcool salé pour laquelle $\lambda = 0^{\text{mill.}},000,588$, ce qui donnerait d dans l'équation

$$d \sin a = \frac{1}{2}\, 0^{\text{mill.}},000,588.$$

quand on aurait mesuré a. La mesure de cet angle s'obtient, au reste, sans difficulté au moyen de deux bougies dont on amène les deux couronnes à se toucher extérieurement en s'éloignant plus ou moins de ces bougies sur une ligne perpendiculaire à la distance qui les sépare.

Toutes les substances astériques produisent encore un autre phénomène qui tient au système de stries parallèles à l'axe, déterminées par les arêtes des molécules prismatiques composantes, sur lesquelles la lumière se réfléchit aussi en traversant la pierre. Ce phénomène consiste en un cercle lumineux passant par la flamme qui sert de point de mire. Non seulement il a lieu dans les substances cristallisées, mais il se voit encore dans toutes les matières irrégulièrement fibreuses, à fibres parallèles, taillées perpendiculairement à leur direction.

Tous les cristaux fibreux, le gypse, la chaux carbonatée fibreuse, le zircon, le quartz, etc., donnent, en travers des filaments, une ligne astérique, et, dans le sens des filaments, un cercle parhélique.

Le grenat, quand on le coupe perpendiculairement à l'axe d'un angle trièdre, donne une astérie à six branches dirigées aux angles, et non, comme dans le saphir, au milieu des côtés de la lame hexaèdre qui résulte de cette section. Les filaments ou fibres, ou solutions de continuité miroitantes sont à l'intersection des plans horizontaux, l'axe de l'angle trièdre étant vertical, avec le plan des faces de l'angle trièdre, ce qu'indiquent comme naturel les faces ou

bases secondaires qui existent sur plusieurs échantillons, et les perpendiculaires à ces fibres vont droit aux angles de la lame hexaèdre, ce que l'inspection d'un cristal dodécaèdre montre de suite; mais de plus l'axe de cet angle trièdre n'est pas très éloigné de la direction des fibres qui appartiennent à un angle solide trièdre voisin, en sorte qu'on aperçoit, avec une lame hexaèdre, non seulement l'étoile à six branches ou rayons, mais encore de plus un cercle parhélique qui passe par l'entrecroisement des branches de l'astérie où est aussi placée la bougie. M. Babinet avait pressenti par la théorie et avec quelque inquiétude l'existence de ce cercle parhélique, dont il a vérifié avec grand plaisir l'existence sur tous les échantillons de grenat astérique qui ont été taillées convenablement. Les grenats astériques à quatre branches ne sont pas très rares. Sur 1,000 à 1,200 grenats pris au hasard dans le commerce, on peut en trouver vingt ou trente qui jouissent de cette propriété; mais, pour l'astérie à six rayons, M. Babinet n'en a trouvé qu'une sur au moins 6,000 grenats qu'il a essayés chez M. Mention, bijoutier. Si l'on considère l'angle solide quadrièdre du grenat, on y reconnait seulement deux systèmes de lignes ou de stries suivant l'intersection de plans parallèles aux faces de l'angle quadrièdre, dont l'axe est ici censé vertical, avec des plans horizontaux dont l'existence est montrée par la troncature fréquente de cet angle quadrièdre, et il en résulte deux systèmes de stries seulement, et, en travers, deux lignes lumineuses seulement, allant aux angles de la lame carrée obtenue par la troncature artificielle de l'angle quadrièdre, comme le montre de suite l'aspect du dodécaèdre. Si, comme l'a fait M. Babinet, on détermine théoriquement un sens quelconque de fibres, et que, perpendiculairement à cette direction, on fasse tailler deux faces parallèles, on a un cercle parhélique qui rend évidente l'existence du système de fibres indiqué par la théorie.

Ce caractère minéralogique de fibres parallèles à des intersections de plans de structure ou de cristallisation est, par suite, mportant en minéralogie, mais il est bien plus général qu'on ne peut l'imaginer au premier aperçu. On pourrait même dire qu'il est un des plus étendus et des plus commodes qu'on puisse consulter, et même dans certaines circonstances c'est un caractère unique. Les exemples sui-

vants, que l'on peut multiplier à l'infini, prouveront suffisamment cette assertion.

On place une petite ouverture d'un millimètre ou deux devant une bougie, et, s'il est nécessaire, devant l'œil une carte percée d'un trou pour limiter l'ouverture de la pupille. La plupart du temps ces deux précautions accessoires sont utiles. Cela posé :

Un cristal hexaèdre de saphir blanc, de la plus belle eau, non soupçonnable de stries *à priori*, donne trois lignes blanches perpendiculaires aux faces du prisme hexaèdre, formant une véritable étoile à six rayons.

Même observation pour un béryl et pour une émeraude, et pour une tourmaline, mais non pour un quartz hexaèdre.

Pour un zircon, la croix sera à huit branches, formant des angles de 45° et non de 60°, et il en sera de même pour l'idocrase et pour tous les cristaux à base carrée.

Si on regarde par deux faces parallèles d'un prisme d'émeraude, et par des rayons perpendiculaires à l'axe, l'on aura une croix à quatre branches donnée par des filaments longitudinaux, résultant de l'intersection mutuelle des faces du prisme d'une part, et de l'autre par des stries parallèles aux arêtes de la base. Le béryl ne donne point cette croix, par manque de ces derniers filaments ; il ne donne qu'une ligne.

Le disthène donne, suivant sa longueur et en travers, comme l'émeraude, une croix rectangulaire.

Le mica donne une grande variété d'apparences, dont nous laissons aux minéralogistes l'étude compliquée. Le plus généralement, les lignes s'y coupent à 60° ; mais il en est qui donnent d'une manière très permanente des entrecroisements à 45° et à 90°.

Les cristaux dont la forme primitive est plus compliquée donnent-ils des angles moins simples ? C'est ce que M. Babinet croit pouvoir affirmer, d'après la baryte sulfatée, le gypse, le mica à deux axes, le feldspath. Mais on n'a pas assez approfondi ce sujet pour qu'on puisse énoncer ici autre chose que des présomptions.

Arrêtons-nous dans cette revue rapide, quelque intéressante qu'elle soit : c'est encore ici l'étude de la nature dans sa toute-puissante variété, dans toute son éclatante splendeur. Nous sommes

heureux d'avoir pu rendre cette analyse plus complète que nous ne l'avions d'abord espéré. Un examen plus approfondi de tous les mémoires publiés jusqu'à ce jour nous a révélé un grand nombre de faits que les traités spéciaux eux-mêmes passent sous silence.

Dans un beau mémoire présenté à l'Académie des sciences en 1836, et que nous venons de reproduire, M. Babinet annonçait qu'il avait projeté, avec M. Dufresnoy, la revue optique de toutes les espèces minérales, en joignant aux notions qu'il signalait toutes celles que la science doit aux physiciens qui ont contribué à enrichir l'optique minéralogique. Le *Traité de minéralogie* de M. Dufresnoy a paru sans que ce noble projet se soit réalisé ! Nous le regrettons vivement dans l'intérêt de la science, que le savoir profond de M. Babinet aurait enrichie d'un grand nombre de faits nouveaux.

APPENDICE

AU PRÉCIS D'OPTIQUE MÉTÉOROLOGIQUE ET MINÉRALOGIQUE.

Polarisation de la lumière atmosphérique.

L'extrait suivant d'une lettre adressée par M. Brewster à M. Babinet, et communiquée à l'Académie des sciences dans la séance du 17 mars 1845, ajoute quelques données précieuses à celles que nous avons enregistrées :

« J'ai maintenant à peu près complété quatre années d'observations sur la polarisation de l'atmosphère, et j'ai déterminé tous les principaux éléments nécessaires pour obtenir les courbes d'égale polarisation.

» Je n'ai point encore cherché les résultats moyens avec la dernière précision, mais ceux qui suivent pourront cependant vous intéresser.

» Distance du point *neutre d'Arago* au *point antisolaire*, ou point opposé au soleil, au moment où le point neutre est à l'horizon . . . . 11° 1/2

» Distance de ce même point neutre au point antisolaire, au coucher du soleil . . . . 18° 1/2

» Distance de ces deux mêmes points à la fin du crépuscule . . . . 25° 0'

» Distance du *point neutre de Babinet* au soleil même (ce point neutre est au-dessus du soleil) quand la hauteur de l'astre est considérable. . . . . 6 ou 7°

» Cette distance s'accroît jusqu'à 18° 1/2, au coucher du soleil.

» Distance d'un troisième point neutre découvert par moi ou du *point neutre de Brewster* au soleil (ce point neutre est au-dessous du soleil) quand le soleil est à une grandeur hauteur . . . . 7 ou 8°.

» Cette distance s'accroît jusqu'à 16 et 18 degrés quand ce point neutre atteint l'horizon. Cette dernière observation avec le soleil peu élevé est très difficile à faire.

» J'ai aussi découvert *un point neutre secondaire* qui accompagne le point neutre de M. Arago, dans des états particuliers de l'horizon. Il se lève après ce premier point neutre ordinaire, et la polarisation entre les deux points est *négative*.

» Il doit nécessairement y avoir pour la même cause un point neutre *secondaire*, lié à chacun des deux points neutres que vous et moi nous avons découverts, mais leur proximité du soleil ne me laisse aucune espérance que je puisse les observer dans ce climat.

» Mon mémoire sur ce sujet sera, je pense, imprimé dans un prochain volume des *Transactions de l'Académie royale d'Irlande*. »

M. Babinet a joint à cet extrait une note curieuse à laquelle nous empruntons les détails qui suivent :

« C'est en 1809 que M. Arago a reconnu que la lumière de l'atmosphère est polarisée, et c'est même par des observations de ce genre qu'il a été conduit à la découverte de la polarisation chromatique. Son polariscope, le premier qui ait été imaginé, est formé d'une plaque de cristal de roche qui se colore dans la lumière polarisée.

» Après avoir reconnu les principaux phénomènes que présente l'atmosphère illuminée par le soleil, et le point neutre situé dans l'azimut opposé au soleil, M. Arago étudia l'effet des réflexions multiples de l'atmosphère, et vit la polarisation se continuer dans des masses d'air qui avaient cessé d'être directement illuminées par le soleil. Il constata le déplacement du point neutre hors de l'azimut opposé à cet astre, ainsi que l'influence des circonstances qui font varier l'illumination directe ou secondaire de la masse d'air que l'on observe. Telles sont l'élévation de la station, la transparence actuelle de l'air, la présence partielle des nuages sur l'horizon, le voisinage de la mer et celui des montagnes, le reflet des grandes nappes d'eau et la lumière du sol plus ou moins éclairé, surtout quand il est couvert de neige. L'inconstance de la plupart de ces effets l'empêcha de faire une carte du ciel sous le rapport de la polarisation, car les principaux phénomènes seuls sont constants. Mais les phénomènes variables ne sont pas moins importants,

ils nous donnent souvent des notions sur l'existence d'objets situés hors de la portée de nos yeux, et même hors des bornes de l'horizon. Sous ce point de vue, l'inconstance des phénomènes de la polarisation de l'atmosphère peut être considérée comme celle des réfractions atmosphériques, mais avec un bien plus grand nombre d'applications importantes dans la météorologie. Ainsi, par un temps de brouillard, le polariscope nous fait connaître si le ciel au-dessus du brouillard est serein ou couvert, ou même s'il est parsemé de nuages isolés laissant entre eux des intervalles bleus et polarisés, et cela au moment même où le brouillard dérobe la vue des objets les plus rapprochés. Ces observations curieuses, que M. Babinet avait notées surtout dans le bouillard du 12 décembre 1843 et des jours suivants, avaient aussi été faites par M. Arago.

En observant la polarisation de l'atmosphère à Etretat, sur les bords de la mer, à l'Occident de la France, M. Babinet fut conduit, comme nous l'avons dit, à reconnaître un second point neutre situé au-dessus du soleil couchant ou qui vient de se coucher. En reprenant depuis ces observations avec son habileté ordinaire, M. Brewster a trouvé sous le soleil, quand il approche de l'horizon, un troisième point neutre qui est parfaitement indiqué par la théorie qui explique les deux autres.

Le travail de M. Brewster contribuera à faire connaître de quel côté il faut pousser les investigations nouvelles pour tirer de la polarisation des notions et même des pronostics météorologiques. Si les indications du savant physicien anglais diffèrent des indications données par d'autres observateurs, il faut mettre en ligne de compte les circonstances locales dont M. Arago a reconnu la puissante influence, et que mettent encore plus en évidence les mesures de M. Bravais dans des stations remarquables des Alpes.

Il est à désirer que M. Brewster nous fasse bien connaître le polariscope ou le polarimètre qu'il a employé, et les moyens qu'il a imaginés pour donner à cet instrument toute la sensibilité possible.

Dans un grand nombre de ses observations, M. Arago avait déterminé, non pas seulement le sens de la polarisation, mais encore la *quantité*, ce qui offre une difficulté beaucoup plus grande compensée par des résultats autrement étendus et précis. La réalisation

d'un polarimètre d'un usage commode et dont la précision ne laissât rien à désirer, réalisation à laquelle M. Babinet travaille depuis longtemps, rendrait à la météorologie des services éminents. M. Babinet pense qu'en mer la formation d'un grain qui ne s'annonce que tardivement à l'œil exercé des matelots, serait reconnue beaucoup plus tôt par la perturbation qu'éprouverait la transparence et par suite la polarisation de l'atmosphère, et qu'il en serait de même du voisinage des côtes.

Polarisation circulaire du cristal de roche.

Une note présentée à l'Académie des sciences par M. Soleil nous permet d'enrichir de quelques détails intéressants notre exposition des phénomènes produits par la rotation que certaines plaques de cristal de roche impriment aux plans de polarisation.

Avant de faire connaître les faits qu'il a observés, M. Soleil rappelle quelques unes des apparences que l'on produit en superposant deux lames de rotations contraires.

L'appareil dont on se sert consiste en un miroir de verre noir convenablement incliné par rapport au faisceau qui le frappe, et en un prisme de Nicoll que l'on tourne jusqu'à ce qu'il ne laisse plus passer aucun des rayons réfléchis par le miroir, c'est-à-dire jusqu'à ce que la *tache noire* que l'on voit à travers le prisme ait acquis son maximum d'intensité.

Les choses étant ainsi disposées :

1° Si l'on place l'un à côté de l'autre, entre le miroir et le prisme, deux plaques de quartz de rotation inverse et d'égale épaisseur, elles donneront la même teinte ; et en faisant tourner le prisme autour de son axe, la teinte changera pour chaque plaque ; elle montera dans l'ordre des anneaux colorés pour l'une des plaques, et descendra pour l'autre.

2° Si l'on superpose les deux plaques, elles se neutraliseront réciproquement, le plan de polarisation sera rétabli, et la tache noire se verra comme avant l'interposition des plaques.

3° Les plaques ainsi superposées, observées au microscope polarisant de M. Amici, donneront les spirales d'Airy.

4° Si les plaques ne sont pas d'égale épaisseur, elles ne donneront

pas la même teinte quand on les regardera l'une à côté de l'autre dans l'appareil ordinaire de polarisation.

5° Par la superposition de ces plaques inégalement épaisses, on ne rétablira pas le plan primitif de polarisation, et, au lieu de la tache noire, on verra une teinte semblable à celle que produirait une plaque égale en épaisseur à la différence des deux plaques en expérience.

6° Ces plaques superposées et observées au microscope polarisant de M. Amici donneront des spirales d'Airy imparfaitement terminées.

Or, toutes ces dispositions se présentent quelquefois dans des lames provenant d'un seul et même canon de quartz.

La première des lames présentées à l'Académie par M. Soleil offrait les particularités suivantes : placée dans l'appareil précédemment indiqué, elle donne une teinte d'un rose jaunâtre. Cette teinte est uniforme sur toute la plaque ; mais dans la partie moyenne elle est partagée en deux plaques par une ligne noire, bordée de chaque côté par une ligne blanche, et plus en dehors par une bande jaune au-delà de laquelle commence la teinte plate. Quand on fait tourner le prisme de Nicoll, les couleurs différentes apparaissent a droite et à gauche de la ligne noire; ces couleurs suivent des ordres inverses, et indiquent que l'une des plaques possède la rotation à droite, tandis qu'elle est à gauche dans l'autre plaque.

La ligne noire résulte évidemment de la superposition de deux couches d'égale épaisseur et de rotation opposée qui se neutralisent complétement. En effet, vue dans le microscope polarisant de M. Amici, cette ligne noire donne des spirales d'Airy d'une grande netteté. On peut aisément comprendre cette neutralisation en admettant que les deux canons de quartz doués de rotation inverse se sont pénétrés l'un l'autre, et se trouvent soudés par les faces de leurs pyramides correspondantes, disposition qui explique le parallélisme de leurs axes : de cette manière, quelle que soit l'épaisseur de la plaque enlevée dans le canon composé, il y aura toujours a l'endroit de la soudure une certaine ligne qui séparera en deux couches d'égale épaisseur les lames de rotation contraire.

Ce qui donne un grand degré de probabilité à cette maniere de voir, c'est qu'on parvient à obtenir les mêmes effets en taillant en

biseau deux lames de quartz d'égale épaisseur et de rotation inverse, et les superposant au niveau des biseaux, qui font chacun avec l'axe du cristal un angle égal à celui que fait ce même axe avec l'une des faces naturelles de la pyramide.

M. Soleil a rencontré une seconde plaque possédant la rotation a gauche, offrant une teinte verte correspondante à son épaisseur, mais présentant en outre une plaque hexagonale allongée, d'une teinte jaune. Le périmètre est nuancé des couleurs du spectre, le rouge étant intérieur et le violet extérieur. Cette plaque hexagonale offre au microscope polarisant des spirales imparfaitement terminées. Il n'est pas douteux que cette plaque ne résulte de la pénétration d'une aiguille de quartz de rotation inverse de celle du reste de la plaque ; mais ici les lames superposées n'ont plus la même épaisseur. Ces suppositions deviennent incontestables quand on observe l'effet produit par la superposition d'une plaque d'épaisseur convenable, et douée de la rotation sur la droite. La plaque, de jaune qu'elle était, devient noire, et elle donne des spirales parfaites ; cela tient évidemment à ce que la plaque supplémentaire, qui, examinée isolément, donne une teinte jaune, forme, par sa jonction avec la couche de même rotation de la lame composée, un ensemble égal en épaisseur à la couche de rotation inverse de cette même lame.

Bien plus, cette plaque supplémentaire doit avoir exactement l'épaisseur de l'excès des couches qui tournent vers la gauche sur celles qui dévient le plan de polarisation vers la droite dans la plaque hexagonale.

La ligne noire signalée par M. Soleil dans la première plaque, et qui se montre toujours à la séparation des plaques de rotation inverse dans une même plaque de quartz, ne doit pas être confondue avec la teinte noire jaspée, disséminée dans les diverses parties de certaines plaques. La ligne noire est toujours nette, et forme une ligne droite ou brisée ; dans ce dernier cas, elle est hexagonale, ou dérive de l'hexagone régulier. Nous venons d'indiquer les conditions de sa formation. La teinte noire jaspée est loin d'offrir la même netteté ; elle n'a rien de régulier dans sa forme, et se distingue essentiellement de la ligne noire en ce qu'elle donne au microscope polarisant des anneaux colorés, coupés par une croix noire, dont la

disposition est tout-à-fait semblable à celles des lames de spath d'Islande perpendiculaires à l'axe.

Nous avons copié par distraction un passage d'un auteur estimé d'où il résulterait que si l'on superpose deux plaques d'épaisseurs égales, mais l'une *dextrogyre*, et l'autre *lévogyre*, leurs effets de rotation se détruisent de telle sorte que l'on voit apparaître un système d'anneaux avec croix noire; il fallait dire, comme nous l'avons indiqué ailleurs, que la superposition de ces plaques donne naissance aux spirales d'Airy. Il y a deux cas forts distincts où la rotation est entièrement détruite; le premier résulte de l'enchevêtrement de cristaux à rotations contraires, comme on le rencontre dans l'améthyste; et l'on voit alors apparaître le système d'anneaux avec croix noire; le second cas a lieu quand on superpose deux plaques de rotations contraires, et d'égale épaisseur; ce dernier donne les spirales d'Airy. Cette observation, fort juste, nous a été faite par M. Soleil.

M. Soleil remarque en terminant que les arrangements moléculaires propres à donner lieu aux phénomènes anormaux que nous venons de rappeler, loin d'être rares, se rencontrent avec une telle fréquence, que ce n'est que par exception que l'on trouve des échantillons de quartz donnant les lames à teintes parfaitement uniformes dans toute leur étendue.

Sur une astérie du diamant.

M. Descloiseaux a inséré dans le numéro 8 des *Comptes-rendus* de cette année une note intéressante sur une astérie du diamant, qui complétera ce que nous avons dit de ce genre d'apparences.

M. Halphen a fait généreusement don à la collection minéralogique du Jardin du Roi de deux plaques de diamant qui offrent un phénomène d'astérie inconnu jusqu'à ce jour dans ce minéral. Voici comment M. Descloiseaux le décrit.

Les deux plaques se présentent sous la forme de petites tables hexagonales à pans trapéziens, alternativement inclinés dans un sens et dans l'autre; les deux bases de ces tables, qui sont des hexagones réguliers, ont seules été polies, tandis que les six autres facettes qui forment leurs bords ont appartenu au cristal ou aux

cristaux dont les lames ont été extraites. La nature des incidences de ces facettes a montré que ces cristaux étaient des octaèdres réguliers, et que les lames avaient été taillées parallèlement à deux faces opposées et parallèles de l'octaèdre.

Le plus grand diamètre des deux lames examinées est de 4 millimètres ; leur épaisseur ne dépasse pas un demi-millimètre.

Si l'on pose à plat sur un papier blanc l'une des faces polies des deux plaques, on observe dans la première, dont le contour annonce qu'elle provient d'un cristal parfaitement régulier, une étoile à six rayons palmés, dirigés du centre vers les angles de l'hexagone, et compris chacun dans deux plans passant par le milieu de six arêtes de l'octaèdre régulier, deux à deux parallèles et opposées.

La seconde plaque, dont le contour offre quelque irrégularité, ne présente que trois segments semi-elliptiques, assez semblables à une feuille de trèfle, et partant du centre pour venir embrasser trois côtés alternes de l'hexagone sur lequel nous supposons que la plaque est placée.

Vus ainsi par réflexion, les dessins que présentent les deux plaques paraissent d'un brun gris de fumée, à contours assez nettement terminés pour être bien saisis à l'œil avec l'aide d'une loupe d'un faible grossissement ; mais si l'on cherche à les observer par transparence, soit à l'œil nu, soit à l'aide du microscope, et à une lumière peu intense, ils deviennent à peine sensibles, et semblent se fondre dans la teinte générale légèrement enfumée qui règne dans la plaque entière.

La disposition des rayons nuageux dans la première et la seconde plaque parait prouver qu'elles ne proviennent pas toutes deux du même cristal de diamant ; mais le passage que l'on observe des uns aux autres permet de penser que dans les deux cas le phénomène est dû à la même cause.

En effet, les pointes inférieures des rayons palmés de la première lame ne viennent pas se toucher à son centre, mais ils se recourbent deux à deux, l'un vers l'autre, de manière à laisser entre eux un petit espace incolore circulaire ou hexagonal ; de plus, entre deux de ces rayons, une teinte plus foncée que celle du reste de la plaque parait les réunir pour former un segment semi-elliptique semblable à ceux de la seconde lame. Dans cette dernière, au con-

traire, la partie la plus foncée des segments en forme de trèfle se trouve concentrée vers leurs bords, et en la faisant jouer sous la lumière, on voit que chacun d'eux tend à se subdiviser en deux palmes, dont la réunion est seulement beaucoup plus complète que sur la première lame. Les trois segments ne se touchent pas, mais ils sont comme soudés ensemble par une petite tache enfumée, et ils laissent aussi au centre un espace incolore hexagonal.

Cette astérie fixe n'a sans aucun doute aucun rapport avec les astéries mobiles qu'on observe dans certains minéraux, et notamment dans le corindon et dans le grenat ; mais elle ressemble beaucoup à une étoile formée par une substance étrangère dans quelques cristaux de saphir et de chaux carbonatée.

La collection de l'École royale des mines possède, en effet, des cristaux de saphir d'un bleu très foncé, provenant d'Expailly, dans la Haute-Loire, en prismes hexagonaux allongés, qui, coupés perpendiculairement à l'axe, montrent dans le plan hexagonal qui résulte de cette coupe une étoile à six rayons dirigés du centre vers le milieu des côtés de l'hexagone, d'une couleur blanchâtre et d'un aspect fibreux.

Dans la même collection se trouve un échantillon de chaux carbonatée d'Helsingfort, en Finlande, cristallisé en prismes hexagonaux surmontés d'un scalénoèdre très surbaissé, dont les arêtes tombent au milieu des faces du prisme. Les trois arêtes les plus aiguës de ce scalénoèdre sont incolores comme la masse du cristal, tandis que les trois arêtes les plus obtuses sont colorées en noir par de l'oxide de manganèse. La même disposition se répétant sur le sommet supérieur et sur le sommet inférieur, et les arêtes les plus obtuses de l'un étant en opposition avec les plus aiguës de l'autre, il en résulte que si les deux sommets du scalénoèdre étaient projetés sur un même plan perpendiculaire à l'axe, cette projection, qui serait un hexagone régulier, présenterait une étoile noire à six rayons dirigés de son centre vers le milieu de ses six côtés.

Ces exemples montrent que les étoiles fixes qu'on observe dans certains minéraux paraissent dus à l'entraînement d'une substance étrangère dans des directions déterminées par la cristallisation. Il est des cas où, comme pour la chaux carbonatée, l'on peut déterminer la nature de cette substance ; il en est d'autres où cela est im-

possible. Pour le diamant en particulier, comme les rayons ou les segments nuageux ne peuvent être examinés au microscope, il serait bien difficile de dire quelle est la matière qui les a produits. Peut-être ne proviennent-ils que d'une modification particulière du carbone suivant les plans naturels du cristal. Ces plans seraient ici les plans mêmes du clivage. En effet, chacun sait que le diamant s'élève parallèlement aux faces de l'octaèdre régulier ; et, comme nous l'avons dit au commencement de cette note, les six palmes de l'une des plaques données par M. Halphen sont comprises chacune dans deux plans parallèles à quatre de ces faces, et elles suivent par conséquent l'intersection de ces plans.

FIN DE LA PREMIÈRE PARTIE.

TABLE DES MATIÈRES.

RÉPERTOIRE

D'OPTIQUE MODERNE.

IMPRIMERIE DE BOURGOGNE ET MARTINET,
RUE JACOB, 30.

RÉPERTOIRE

D'OPTIQUE MODERNE

OU

ANALYSE COMPLÈTE DES TRAVAUX MODERNES RELATIFS AUX PHÉNOMÈNES DE LA LUMIÈRE;

PAR

M. L'ABBÉ MOIGNO,

Auteur des Leçons de calcul différentiel et intégral, Membre de l'Académie de Nancy, de la Société orientale, etc., etc.

Deuxième Partie.

PARIS,

A. FRANCK, RUE RICHELIEU, 69;

LEIPSIG,

MÊME MAISON.

1847.

PRÉFACE.

Nous avons cru longtemps que notre Répertoire d'Optique n'aurait que deux volumes, mais la surabondance des matières nous force à dépasser ces limites trop resserrées : même en composant notre seconde partie de soixante feuilles d'impression, nous n'aurions pas exposé l'état actuel de la science ; cette exposition complète doit être cependant le principal mérite de cet ouvrage, et ce qu'on doit y chercher avant tout. Les grandes et difficiles questions des couleurs objectives et subjectives ; l'analyse aussi des recherches innombrables qui ont eu pour objet, dans ces dernières années, les rayons calorifiques, chimiques, magnétiques, phosphorogéniques, etc., nous ont entraîné bien plus loin que nous ne pensions. Espérons que l'on ne nous fera pas un reproche de ces inévitables longueurs.

Les deux années qui viennent de s'écouler ont été non moins fécondes que leurs aînées : elles nous donnent à enregistrer un nombre considérable de découvertes brillantes, d'études neuves et profondes ; ces découvertes, ces études se trouveront plus à l'aise dans notre troisième partie. Nous pourrons, de cette manière, accorder une grande place aux phénomènes si neufs, si inattendus, découverts par l'immortel Faraday ; et essayer une théorie de cette rotation singulière du plan de polarisation du rayon lumineux sous l'influence des forces électriques et magnétiques. Le beau mémoire de M. Bravay sur la théorie et la reproduction artificielle des halos, des par-

helies, etc.; les expériences de M. Jamin sur la réflexion à la surface des métaux; les notes de M. Magnus sur la diffraction; de M. Dove sur la polarisation; les aperçus théoriques de MM. Airy, Faraday, Laurent, Doppler, Müller, etc., etc., seront aussi exposés avec toute l'étendue convenable.

Comme toujours, notre analyse exacte et claire sera accompagnée d'un commentaire et d'une critique bienveillante, mais sérieuse : il ne tiendra pas à nous que les recherches insuffisantes et les théories hasardées, sous quelque nom qu'elles s'abritent, soient énergiquement repoussées.

Un travail de longue haleine que nous n'avons pu entreprendre qu'avec la collaboration habile et patiente d'un artiste célèbre, notre ami, M. Soleil, le catalogue raisonné et figuré, des propositions d'optique à démontrer, des expériences qui constituent la démonstration, et des appareils à l'aide desquels se font les expériences, occupera près de dix feuilles de notre troisième partie, et suffira seul, nous en avons la certitude, pour la faire rechercher. Nous donnerons aussi, aidé d'un naturaliste exercé, de M. Pappenheim, une théorie complète de l'œil, et l'analyse critique des travaux qui ont eu pour objet les phénomènes de la vision.

Un trop long intervalle de temps s'est écoulé entre la publication de la première et de la seconde partie de cet ouvrage; nous pouvons assurer qu'il n'en sera plus ainsi. Notre troisième partie paraîtra certainement à la fin de mars prochain.

Paris, ce 31 janvier 1848.

RÉPERTOIRE
D'OPTIQUE MODERNE.

DEUXIÈME PARTIE.

SECTION CINQUIÈME.

SOLUTION DE QUELQUES DIFFICULTÉS. — EXPLICATION DE CERTAINS FAITS MYSTÉRIEUX.

PREMIÈRE DIFFICULTÉ. *Pourquoi et comment la vitesse de la terre ne modifie-t-elle en rien les phénomènes de réfraction et d'interférence qui ont leur cause dans la vitesse de la lumière? Digression relative à la lumière zodiacale et aux aurores polaires.*

La lumière, comme nous l'avons vu, se meut avec une vitesse que l'imagination peut à peine concevoir. Cette vitesse est si grande par rapport à celles que nous pouvons communiquer nous-mêmes, ou qui existent à la surface de la terre, que l'on peut regarder comme instantané le passage de la lumière d'un corps terrestre à l'autre. Mais le mouvement qui emporte la terre autour du soleil est lui-même très rapide, la terre parcourt près de sept lieues par seconde, et quoique cette vitesse ne soit pas la dix-millième partie de celle de la lumière, on comprend cependant qu'elle doive avoir une influence réelle sur certains phénomènes de vision. Chaque spectateur sur la terre participe au mouvement général du globe, sa rétine a donc réellement changé de place avant que les rayons venus des étoiles aient traversé l'espace qui les séparait de l'œil; et le point où se produit la sensation ne sera pas le même que si le spectateur fût resté en repos. L'œil, dès-lors, assignera à l'astre dans l'espace une position apparente différente de sa position réelle : cette déviation a reçu le nom caractéristique d'*aberration de la lumière*. Bradley remarqua le premier comme un fait dont on ignorait la cause, que les étoiles paraissent décrire dans le ciel de petites ellipses annuelles d'environ 40" de diamètre : la découverte de la vitesse de la lumière, faite tout récemment par Roemer, lui en

*

donna l'explication. Plus tard, grâce aux observations excellentes de Brinkley et de Struve, on détermina avec une très-grande précision l'expression numérique de l'aberration, et l'on put même en conclure une nouvelle valeur de la vitesse de la lumière, qui ne différa que d'un deux-centième de la valeur déduite des éclipses des satellites de Jupiter. Au premier point de vue, rien de plus simple que le phénomène de l'aberration, et cependant son explication dans le système des ondulations avait effrayé Fresnel; et elle a été dans ces dernières années l'objet de recherches et de discussions animées qui se continuent encore, et que nous ne pourrons analyser que plus tard.

La vitesse propre des autres astres, bien plus grande que celle de la terre, doit exercer aussi une influence appréciable, et M. Doppler lui attribue les changements de couleurs des étoiles: quand cette opinion singulière aura reçu tous ses développements, nous la discuterons. Nous aborderons seulement ici deux difficultés complétement étudiées sinon complètement résolues.

Il résulte d'expériences faites par M. Arago que les rayons lumineux émanant de deux étoiles situées dans l'écliptique, l'une en avant de l'observateur, ou vers laquelle la terre marche, l'autre en arrière, et dont la terre s'éloigne, subissent dans un prisme de verre la même réfraction, quoique la vitesse de la lumière soit diminuée dans un cas, augmentée dans l'autre, de la vitesse de la terre.

M. Arago a fait observer que, pour expliquer ce résultat dans le système de l'émission, il suffirait de supposer la vision produite, dans les deux cas, par des portions différentes de la radiation, pour lesquelles la vitesse de propagation serait la même. Nous avons déjà dit que cette explication ne reposait sur aucun fondement solide, et qu'elle n'était nullement probable; elle ne rendrait pas compte d'ailleurs de la seconde difficulté que fait naître la célèbre expérience négative, communiquée trois fois à l'Institut par M. Babinet, faite chaque fois avec des appareils nouveaux, et dont il résulte qu'une plaque réfringente entraînée par la terre retarde les rayons lumineux exactement de la même quantité, soit lorsque le sens du mouvement de la lumière conspire avec celui de la terre dans l'espace, soit lorsque les deux mouvements sont en sens contraire. M. Babinet avouait qu'il n'avait aucunement l'explication de cette expérience.

Les considérations suivantes de M. Cauchy suffisent, il nous semble, à résoudre ces deux grandes difficultés.

Par vitesse de la lumière, on peut entendre dans le système des ondulations, ou la *vitesse absolue* avec laquelle une onde se déplace dans l'espace, ou la *vitesse relative* avec laquelle cette onde change de position dans la masse du fluide éthéré qu'elle traverse. Or, la seconde de ces deux vitesses sera évidemment celle qui déterminera les réfractions d'un rayon passant de l'air dans le verre, et donnera naissance aux interférences, si l'on admet, comme il est naturel de le supposer, que la terre emporte avec elle dans l'espace, non seulement son atmosphère aérienne, mais encore une masse considérable d'éther, ou ce qu'on pourrait appeler son atmosphère éthérée. Dans cette hypothèse, tous les phénomènes de réflexion, de réfraction, d'interférence, observés à la surface de la terre, seront les mêmes que si la terre perdait son mouvement de rotation diurne, et son mouvement annuel de translation autour du soleil. Ces mouvements ne pourront donc faire varier que la direction des plans des ondes, et par conséquent la direction du rayon lumineux, en produisant, comme l'on sait, le phénomène de l'aberration.

Cette hypothèse s'était présentée à l'esprit de Fresnel, et M. Savary avait songé à en déduire la réponse aux doutes soulevés par MM. Arago et Babinet; mais ces deux savants se laissèrent effrayer par les difficultés que l'on rencontre quand de ces considérations on veut tirer par des calculs précis la mesure de l'aberration. Nous croyons avec M. Cauchy que ces difficultés ne doivent pas exister, et sont loin d'être un motif suffisant pour rejeter un hypothèse conforme à toutes les analogies. En effet, nous voyons sans cesse les corps qui se touchent, ou qui agissent les uns sur les autres, se mouvoir de concert. Notre soleil, s'il se meut dans l'espace, entraine avec lui tout le système planétaire. Les mouvements de translation et de rotation de la terre sont partagés par les corps qu'elle porte, comme par la mer qui la recouvre, comme par l'atmosphère qui l'entoure. Il serait singulier que le fluide éthéré, sur lequel les corps solides ou fluides ont une action évidente, comme le prouvent les phénomènes de la réflexion, de la réfraction et de la polarisation circulaire, fit seul exception à cet égard.

Nous adhérons pleinement à ces réflexions du savant géomètre

en faisant nos réserves sur les inductions suivantes, dont la témérité effraya tout d'abord notre imagination. « L'atmosphère éthérée, ajoute M. Cauchy, qui entourerait la terre dans l'hypothèse proposée, et les atmosphères semblables qui entoureraient à une grande distance le soleil, la lune et les autres astres venant à se mouvoir avec les astres mêmes, il pourrait se produire des phénomènes lumineux vers les limites de ces atmosphères, et à ces limites l'éther pourrait être mis en vibration par des mouvements semblables à ceux qu'on observe quand une trombe traverse l'air, ou quand un vaisseau vogue sur une mer tranquille. Peut-être ne serait-il pas déraisonnable d'attribuer à une semblable cause certains phénomènes lumineux, par exemple, *la lumière zodiacale*, *les aurores boréales* ou *australes*, la lumière des *nébuleuses planétaires*, ou même celle des *comètes*. On pourrait supposer que la lumière zodiacale dépend de la rotation du soleil sur lui-même, et que le phénomène des aurores boréales se lie au mouvement diurne de la terre. On concevrait alors pourquoi la lumière zodiacale paraît, à une grande distance du soleil, s'étendre dans le plan de l'équateur solaire. Le fluide éthéré, suivant la remarque de M. Ampère, pouvant n'être autre chose que le double fluide électrique, on concevrait encore que le phénomène des aurores boréales fût intimement lié avec des phénomènes électriques. De plus, l'éclat des comètes devrait, conformément à l'observation, s'accroître dans le voisinage du soleil, si le fluide éthéré devenait plus dense près de cet astre, et si l'intensité des vibrations lumineuses augmentait avec le mouvement de deux masses d'éther contiguës. »

LUMIÈRE ZODIACALE.

Puisque ces considérations de M. Cauchy nous ont amené à parler de la lumière zodiacale, on trouvera sans doute naturel que nous entrions dans quelques détails au sujet de ce phénomène, entouré encore de grandes obscurités, et dont l'explication est loin d'être jusqu'ici satisfaisante. L'apparence générale de la lumière zodiacale que l'on observe surtout aux équinoxes de printemps et d'automne, et plus particulièrement vers le 13 novembre, est celle d'un double fer de lance, ou de deux pyramides opposées ayant le corps du so-

leil pour base, et dont les sommets sont dirigés vers le point culminant de l'équateur. Dominique Cassini étudia pendant deux ans cette lueur pâle, blanchâtre, avec autant de sagacité que de constance, et arriva à conclure que le corps du soleil est enveloppé d'une nébuleuse, ayant la forme d'un sphéroïde très aplati et presque lenticulaire, dont les pôles seraient situés sur l'axe de rotation du soleil, tandis que sa plus grande section, ou son équateur, s'étendrait dans le plan de l'équateur solaire plus loin que les orbes de Mercure et de Vénus, et aurait pu même, dans certains cas, être suivi visiblement au-delà de l'orbe terrestre. La plus grande section de cette nébuleuse, semblable à une lueur blanchâtre répandue circulairement autour du soleil, coïncidant avec le plan de l'équateur solaire, elle n'est guère inclinée sur l'écliptique que de six ou sept degrés ; ce qui fait qu'elle est renfermée dans les limites du zodiaque. Voilà pourquoi Cassini lui donna le nom de lumière zodiacale que les astronomes ont depuis conservé. Cette lueur, par intervalles, éprouve des changements propres, réels et considérables ; elle n'est pas toujours circulaire, non plus que symétrique, dans sa distribution autour du soleil ; et Cassini, ainsi que Laplace, a cru pouvoir conclure des lois générales de l'attraction qu'elle n'est point l'atmosphère du soleil : car, disent-ils, l'atmosphère solaire ne peut pas s'étendre jusqu'à l'orbe de Mercure, et ne peut atteindre, à plus forte raison, l'orbe de Vénus. En outre, l'axe polaire d'un sphéroïde ne peut pas être moindre que 2/3 de l'axe équatorial, tandis que la nébuleuse solaire est si aplatie qu'elle disparaît presque comme l'anneau de Saturne quand la terre passe dans ses nœuds et qu'on la voit par son tranchant. On était donc conduit naturellement à conjecturer que la nébuleuse solaire est formée par une multitude innombrable de planètes ou astéroïdes, circulant autour du soleil comme les planètes visibles, Mercure et Vénus. Admettons un instant cette hypothèse : alors, lorsque la terre dans les premiers jours de novembre s'approchera du nœud ascendant de la nébuleuse solaire, les astéroïdes ressentiront l'influence de sa force attractive, et selon leur position, leur direction de mouvement et leur distance actuelle, les orbites qu'ils décrivaient autour du soleil seront troublés, surtout si par une expansion accidentelle ou par ses dimensions ordinaires l'extrême limite de la nébuleuse visible ou invisible

s'est matériellement étendue jusqu'à l'orbe terrestre ou un peu au-delà, comme on l'a plusieurs fois observé. Des changements pareils, plus divers et plus nombreux, doivent s'opérer dans les orbites des astéroïdes lorsque la terre s'approche de leurs nœuds ascendants sur l'écliptique, et il résulte naturellement de ces perturbations qu'un certain nombre de ces petits astres tombent dans l'atmosphère de la terre, ou sont disposés à être rencontrés par elle dans leurs révolutions suivantes, hors de leurs nœuds primitifs. Ceux que la terre absorbera tomberont sur la surface, suivant des directions absolues qui pourront être fort diverses. Toutefois, comme en novembre la terre approche de son périhélie, sa vitesse de circulation surpassera vraisemblablement la moyenne de celles qu'auront alors les astéroïdes situés à la même distance du soleil, de sorte que s'il s'en trouve qui soient un peu en avant d'elle au-delà de leur nœud ascendant quand elle approche de ce point, elle pourra les rejoindre ou seulement s'en rapprocher assez pour les ramener ensuite à elle et les absorber. Alors le sens de chute qui pourrait devenir le plus abondant serait opposé au mouvement propre des astéroïdes dans leurs orbites, ou plutôt il suivrait une direction composée de ce mouvement et du mouvement propre de la terre.

Rien n'exige d'ailleurs que cette absorption doive se reproduire avec une égale intensité toutes les fois que la terre revient au même point de son orbite, c'est-à-dire tous les 13 novembre; au contraire, sa production même semblerait devoir épuiser les matériaux qui lui donnent naissance. Il ne faudrait pas inférer non plus de sa périodicité annuelle qu'elle dût s'opérer également au point diamétralement opposé de l'orbe terrestre, où la terre arrive vers le 10 mai; car, dans la position actuelle de l'ellipse terrestre, la terre est plus éloignée du soleil au 10 mai qu'elle ne l'est au 13 novembre. La différence surpasse cinq cent vingt rayons, terrestres, et, par suite de la forme lenticulaire qu'on lui voit toujours, la nébuleuse sera près du nœud descendant, plus mince généralement, et plus rare, que lors du passage de la terre dans son nœud ascendant, ce qui doit diminuer les chances d'absorption.

Les deux planètes inférieures, Mercure et Vénus, traversent aussi deux fois la nébuleuse solaire dans chacune de leurs révolutions; et comme elles sont plus près du soleil, ces passages s'opè-

rent dans les parties de la nébuleuse qui sont constamment visibles et conséquemment plus épaisses. Les nœuds et les inclinaisons de ces planètes les écartent très peu du plan de la nébuleuse, à ce point qu'elles semblent n'en être en quelque sorte que des portions plus massives, et qu'on pourrait presque dire que si les orbites de Mercure et de Vénus étaient visibles matériellement dans toute leur étendue, nous les verrions habituellement de la même figure, dans la même disposition à l'égard du soleil, et aux mêmes temps de l'année que la lumière zodiacale. La réunion de ces circonstances a dû amener des rencontres avec les astéroïdes, et développer des perturbations analogues à celles que nous venons d'analyser pour la terre. Il a dû en résulter la dissémination d'une multitude infinie de particules de la nébuleuse sur des plans peu inclinés à l'écliptique, où la terre peut les rencontrer accidentellement dans tous les points de son cours.

Ces considérations, que nous avons empruntées à M. Biot, lui ont été suggérées par un travail très étendu et très remarquable de M. Olmsted, qui, le premier, appela l'attention des savants sur le météore du 13 novembre, ou l'apparition périodique au 13 novembre d'une multitude de bolides ou étoiles filantes. Dans la nuit du 12 au 13 novembre 1833, les météores se succédaient à de si courts intervalles, qu'ils formaient comme une pluie de feu. Ils se montraient dans tant de régions du ciel à la fois qu'en essayant de les compter on ne pouvait guère espérer d'arriver qu'à de grossières approximations. L'observateur de Boston les assimilait, au moment du maximum, à la moitié du nombre des flocons qu'on aperçoit dans l'air pendant une averse ordinaire de neige. Des évaluations modérées portent leur nombre à des centaines de mille. Tous ces astéroïdes partaient d'un même point du ciel situé près de γ du lion, et cela quelle que fût d'ailleurs, par l'effet du mouvement diurne de la sphère, la position de cette étoile. Voilà assurément un résultat fort étrange. En 1799, une pluie semblable fut observée en Amérique par M. de Humboldt; au Groënland, par les frères moraves; en Allemagne, par diverses personnes; la date est la nuit du 11 au 12 novembre. L'Europe, l'Arabie, etc., en 1832, furent témoins du même phénomène, mais sur une échelle moindre : la date est encore la nuit du 12 au 13 novembre. Cette même

périodicité a été constatée par toutes les observations anciennes et récentes. On n'a entrevu jusqu'ici la possibilité de cette étonnante apparition qu'en supposant qu'entre les grandes planètes il circule autour du soleil des milliards de petits corps, qui ne deviennent visibles qu'au moment où ils pénètrent dans notre atmosphère, et s'y enflamment. M. Olmsted eut, le premier, la pensée d'attribuer ce phénomène à l'existence d'une grande nuée météorique circulaire autour du soleil, dans une orbite inclinée à l'écliptique d'environ 7°. M. Olmsted a aussi cru que le météore du 13 novembre 1833 pourrait avoir une relation avec la lumière zodiacale; il donna même comme indice de cette connexion la remarque curieuse qu'au mois de novembre 1833 la lumière zodiacale a été extraordinairement apparente, beaucoup plus qu'elle ne l'avait été à la même époque, en 1834, et qu'elle ne le fut en 1835; il inféra de là que la nuée météorique pourrait bien être précisément cette même lumière, devenue plus apparente et plus grande en novembre, parce qu'elle serait vue de la terre à une moindre distance, dans son aphélie, en conjonction avec le soleil. A M. Biot appartient le rapprochement de la nuée météorique avec la nébuleuse solaire de Cassini. Les déductions sur lesquelles ce rapprochement se fonde paraissent évidentes à M. Biot, parce qu'elles dérivent des faits et des lois de l'attraction; il ne les présente néanmoins qu'avec une extrême réserve, connaissant combien il est facile d'être trompé en pareille matière par les analogies les plus vraisemblables, lorsqu'on ne peut pas éprouver complétement leur réalité par un calcul rigoureux. L'illustre physicien ajoute avec raison qu'on ne ferait presque jamais de nouveaux pas dans les sciences physiques, qu'on n'oserait jamais y pressentir de lointains rapports, s'il fallait n'essayer de rapprocher les faits que lorsque le calcul peut s'y appliquer réellement. Une coïncidence vraiment curieuse, c'est que la seule présence des particules de la nébuleuse solaire près de leurs nœuds ascendants à une distance du soleil peu différente de celle de la terre, leur assigne une vitesse de circulation propre, à peu près égale à la sienne, à peu près coïncidente en projection actuelle relativement à l'écliptique, mais dirigée au nord de ce plan vers un point du ciel peu éloigné de θ du lion. Or, tous les météores du 13 novembre partaient d'un même point du ciel situé dans cette même constellation.

Nous croyons devoir observer que, suivant une remarque de M. Olbers, l'opinion, peu probable, de M. Biot est combattue par deux objections graves : car 1° une vitesse en sens contraire de la terre, vitesse de quatre, cinq milles et plus par seconde, certainement observée dans la marche d'un grand nombre d'étoiles filantes, est tout-à-fait inconciliable avec cette hypothèse, que les particules de la lumière zodiacale se meuvent autour du soleil d'un mouvement direct, conformément aux lois qui règlent tous les mouvements planétaires. 2° Les nœuds de l'équateur solaire ne se trouvent pas dans le voisinage du 20e degré du taureau, mais bien dans le voisinage du 20e degré des jumeaux.

Il est vrai aussi, comme le fait remarquer M. Arago, que de très bons esprits regardent les résultats de Dominique Cassini comme peu dignes de confiance. Il leur répugne surtout d'admettre que des changements physiques sensibles puissent s'opérer simultanément dans l'étendue immense que la lumière zodiacale embrasse. Suivant eux, les variations d'intensité et de longueur signalées par ce grand astronome n'avaient rien de réel, et il ne faut en chercher l'explication que dans des intermittences de la diaphanéité atmosphérique. Mais, ajoute M. Arago, il ne serait peut-être pas impossible de trouver dès ce moment, dans les observations de Fatio, comparées à celles de Cassini, la preuve que des variations atmosphériques ne sauraient suffire à l'explication des phénomènes signalés par l'astronome de Paris. Quant à l'objection tirée de l'immensité de l'espace dans lequel les changements physiques devraient s'opérer, elle a perdu toute sa gravité ; et quoique nous ne sachions pas, dit M. Biot, comment ni par quelles causes de grandes révolutions pourraient s'opérer encore actuellement dans la nébuleuse solaire, ce n'est pas un motif suffisant pour les supposer impossibles. Il s'en fait certainement sous nos yeux d'immenses à la surface du soleil, que nous voyons par intervalles parsemée de taches plus grosses que la terre, lesquelles se dissipent en quelques jours, tandis que d'autres fois elles persistent pendant plusieurs mois, et que dans d'autres périodes son disque en est tout-à-fait exempt. Jusqu'à quelles distances les causes de cette agitation peuvent-elles s'étendre ? Ce sont assurément des révolutions non moins extraordinaires, et en apparence assez analogues, qui s'opèrent au-

tour de certaines comètes lorsqu'elles s'enveloppent d'un paraboloïde lumineux soutenu à plus de 80,000 lieues de distance de leur nébulosité intérieure, et séparé d'elles par un espace sans matière visible, comme on le conclut des observations d'Olbers et du premier Herschell pour la grande comète de 1811; phénomène qui s'opère et subsiste à d'immenses distances du soleil, présentant à ces distances de rapides variations qui lui semblent indubitablement propres, et que le second Herschell a vu se produire en quelques heures sur la comète de Halley longtemps après son passage au périhélie. L'analogie de ces faits avec les variations soupçonnées par Cassini dans la nébuleuse solaire ôte donc à celles-ci leur apparence d'impossibilité.

Que conclure de cette digression? Une chose certaine, c'est que la nature de la lumière zodiacale est restée jusqu'ici inconnue. Mairan voulait qu'elle fût simplement l'atmosphère du soleil lumineuse par elle-même ou éclairée, atmosphère qui, à cause de son mouvement de rotation rapide, aurait une forme lenticulaire. Mais les lois de la gravitation, nous le disions tout-à-l'heure, ne permettraient pas à cette atmosphère de s'étendre jusqu'à l'orbite de Mercure, comme le fait souvent la lumière zodiacale; ici donc encore nous rencontrons une difficulté nouvelle, et l'ensemble même de ces diverses hypothèses nous reporte à l'idée de M. Cauchy, qui ne nous paraît plus si étrange, et qui a peut-être pour elle l'avenir.

Il nous reste encore à rappeler la recommandation que fait M. Arago aux observateurs, à ceux surtout placés dans les régions équinoxiales, de faire de la lumière zodiacale un sujet spécial d'étude. Eux seuls pourront décider si Dominique Cassini s'était suffisamment défié des causes d'erreur auxquelles on est exposé dans nos atmosphères variables; s'il avait pris en assez grande considération la pureté de l'air, lorsqu'il annonçait que la lumière zodiacale est constamment plus vive le soir que le matin; qu'en peu de jours sa longueur peut varier entre 60 et 100°; que ces variations sont liées à l'apparition des taches solaires, de telle sorte, par exemple, qu'il y aurait eu dépendance directe et non pas seulement coïncidence fortuite entre la faiblesse de la lumière zodiacale en 1688, et l'absence de toute tache ou facule sur le disque solaire dans cette même année. Les observateurs devront, soir et matin,

après le coucher du soleil ou avant son lever, prendre note des constellations que la lumière zodiacale traversera, de l'étoile qu'atteindra sa pointe, et de la largeur angulaire du phénomène près de l'horizon.

Ajoutons que M. Mathiessen a cru remarquer que la lumière zodiacale reçue dans le cône condensateur d'une très bonne pile thermo-électrique de M. Ruhmkorpf, donnait une déviation de 15°, qu'on ne pouvait pas attribuer, dit-il, à l'atmosphère plus chaude vers le point de coucher du soleil. La lumière de la grande comète du mois de mars 1843, visible sur l'horizon en même temps que la lumière zodiacale, ne produisait aucune déviation. On doit regarder ces observations comme fort douteuses; car la note, quoique courte, de M. Mathiessen n'est pas exempte de contradictions.

Nous venons de combler la première lacune volontaire que renfermait notre Précis d'optique météorologique. Nous avions omis à dessein tout ce qui concernait la lumière zodiacale et la *lumière polaire*, *aurore boréale et australe*. Mais puisqu'à l'occasion de la note de M. Cauchy, nous nous sommes quelque peu étendu sur le premier de ces phénomènes, il est naturel que nous entrions aussi dans quelques détails au sujet du second, plus mystérieux et plus énigmatique encore.

AURORE POLAIRE, BORÉALE OU AUSTRALE.

Empruntons d'abord à M. Lottin, l'un des plus zélés observateurs de l'expédition d'Islande, la description et le dessin de ce phénomène qu'il a vu dans toute sa splendeur.

« Le soir, entre quatre et huit heures, la brume légère qui règne presque habituellement au nord dans la direction du Fiord, ou golfe de Bossekop, à la hauteur de 4 à 6°, se colore à sa partie supérieure, ou plutôt se frange des lueurs de l'aurore qui existe derrière. Cette bordure devient plus régulière et forme un arc vague d'une couleur jaune pâle dont les bords sont diffus, et dont les extrémités s'appuient sur les terres.

» Cet arc monte plus ou moins lentement, son sommet restant dans le méridien magnétique ou à très peu près; ce qu'il n'est pas facile de déterminer avec exactitude, à cause de son mouvement ascensionnel et de sa forme déprimée.



» Bientôt des stries noirâtres séparent régulièrement la matière lumineuse de l'arc. Les rayons sont formés, ils s'allongent, se raccourcissent lentement ou instantanément ; ils dardent, augmentant ou diminuant subitement d'éclat. La partie inférieure, les pieds des rayons offrent toujours la lumière la plus vive, et forment un arc plus ou moins régulier : la longueur de ces rayons est souvent très variée, mais tous convergent vers un même point du ciel, indiqué par la direction de la pointe sud de l'aiguille d'inclinaison ; parfois ils se prolongent jusqu'à leur point de réunion, formant ainsi le fragment d'une immense coupole lumineuse.

» L'arc continue de monter vers le zénith ; il éprouve un mouvement ondulatoire dans sa lueur, c'est-à-dire que d'un pied à l'autre l'éclat de chaque rayon augmente successivement d'intensité. Cette espèce de courant lumineux se montre plusieurs fois, et bien plus fréquemment de l'ouest à l'est, que dans le sens opposé. Quelquefois, mais rarement, un mouvement rétrograde a lieu immédiatement après le premier ; et, aussitôt que cette lueur a parcouru successivement tous les rayons de l'est à l'ouest, elle se dirige dans le sens inverse, revenant ainsi à son point de départ, sans qu'on puisse dire si ce sont les rayons qui éprouvent alors un mouvement de translation à peu près horizontal, ou si cette lueur plus vive se transporte d'un rayon à l'autre, de proche en proche sans que ceux-ci éprouvent de déplacement.

» L'arc offre aussi un mouvement alternatif dans le sens horizontal, figurant les ondulations ou les plis d'un ruban ou d'un drapeau agité par le vent, comme on le voit dans la figure ci-jointe. Par-



fois, un des pieds, et même tous deux, abandonnent l'horizon; alors les plis deviennent plus nombreux, mieux prononcés, l'arc n'est plus qu'une longue bande de rayons qui se contourne, se sépare en plusieurs parties, formant des courbes gracieuses qui se referment presque sur elles-mêmes en offrant, n'importe dans quelle partie de la voûte céleste, ce que l'on a probablement nommé jusqu'ici la couronne des aurores. Alors l'éclat des rayons varie subitement d'intensité, et dépasse celui des étoiles de même grandeur; ces rayons dérivent avec rapidité; les courbes se forment et se déroulent comme les plis et replis d'un serpent. Puis les rayons se colorent: la base est rouge, le milieu vert, le reste conserve sa couleur lumineuse jaune clair. Les couleurs ont toujours, sans exception, conservé ces positions respectives; elles sont d'une admirable transparence: le rouge approche de la teinte sang clair, le vert de celle d'une émeraude pâle. L'éclat diminue, les couleurs disparaissent, tout s'éteint subitement ou s'affaiblit peu à peu.

» Des fragments d'arc reparaissent: l'arc lui-même se reforme, continue son mouvement ascensionnel et approche du zénith; les rayons, par l'effet de la perspective, deviennent de plus en plus courts; on peut juger de l'épaisseur de l'arc, qui offre parfois alors une large zone de rayons parallèles; puis le sommet de l'arc atteint le zénith magnétique, point désigné par l'extrémité sud de l'aiguille d'inclinaison. Alors les rayons sont vus par leurs pieds: s'ils se colorent en ce moment, ils montrent une large bande rouge à travers laquelle on distingue les nuances vertes qui leur sont supérieures; et s'ils subissent ce mouvement de translation horizontale dont nous [illegible] parlé plus haut, les pieds forment une longue zone sinueuse [illegible]dulante, tandis que dans tous ces changements continuels les [illegible] n'éprouvent jamais d'oscillation dans le sens de leur axe, et [illegible]rvent toujours leur parallélisme.

[illegible] Pendant l'intervalle de temps qui vient d'être décrit, de nou[illegible]x arcs se sont présentés à l'horizon, commençant d'une manière [illegible]se ou avec des rayons tout formés et très vifs. Ils se succèdent [illegible]ssant à peu près par les mêmes phases, et se maintiennent à [illegible]nce les uns des autres; on en a compté ainsi jusqu'à neuf ap[illegible]yés sur les terres, et rappelant par leur disposition ces toiles [illegible]ntrées qui vont d'une coulisse à l'autre et figurent le ciel de nos

scènes théâtrales. Parfois les intervalles diminuent, plusieurs de ces arcs se serrent l'un contre l'autre : c'est une large zone de rayons parallèles qui traversent le ciel et vont disparaître vers le sud, s'affaiblissant rapidement après leur passage au zénith. Mais parfois aussi, lorsque cette zone occupe le haut du ciel s'étendant de l'est à l'ouest, la masse des rayons qui ont déjà dépassé le zénith magnétique paraît tout-à-coup venir du sud, et forme avec ceux du nord la véritable couronne boréale dont tous les rayons convergent vers le zénith. Ainsi cette apparence de couronne ne vient, sans doute, que d'un simple effet de perspective, et l'observateur, placé dans cet instant à une certaine distance au nord ou au sud, n'apercevrait qu'un arc.

» La zone totale des rayons étant moins épaisse dans le sens nord et sud que dans le sens est et ouest, puisqu'elle s'appuie souvent sur les terres, la couronne a une forme elliptique. Mais cela n'a pas toujours lieu, on l'a vue circulaire ; les rayons, inégaux, ne s'étendent pas à plus de 8 ou 12° du zénith, tandis que d'autres fois ils vont jusqu'à l'horizon.

» Si l'on pense qu'alors tous ces rayons dardent avec vivacité, variant continuellement et subitement dans leur longueur et dans leur éclat, que de belles teintes rouges et vertes les colorent par intervalles, que les mouvements ondulatoires ont lieu, que les courants lumineux se succèdent, et enfin que la voûte céleste tout entière offre une immense et magnifique coupole étincelante, dominant un sol couvert de neige, qui lui-même sert de cadre éblouissant à une mer calme et noire comme un lac d'asphalte, on n'aura encore qu'une idée très imparfaite de l'admirable spectacle qui s'offre à l'observateur et qu'il faut renoncer à décrire.

» La couronne ne dure que quelques minutes ; elle se forme quelquefois instantanément sans aucun arc préalable. Il y en a rarement plus de deux dans la même nuit, et bien des aurores n'en ont montré aucune trace.

» La couronne s'affaiblit ; tout le phénomène est au sud du zénith, formant des arcs plus pâles et qui disparaissent généralement avant d'avoir atteint l'horizon sud. Le plus ordinairement tout ceci a lieu dans la première moitié de la nuit, après quoi l'aurore paraît avoir perdu de son intensité ; des faisceaux de rayons, des bandes.

des fragments d'arcs paraissent et disparaissent par intervalles; puis les rayons deviennent de plus en plus diffus : ce sont des lueurs vagues et faibles qui finissent par occuper tout le ciel, groupées comme de petits *cumulus*, et désignées sous le nom de *plaques aurorales*. Leur lumière lactée éprouve souvent des changements très vifs dans son intensité, semblables à des mouvements de dilatation et de contraction qui se propagent du centre à la circonférence, et réciproquement, rappelant ceux de ces animaux marins nommés méduses. La lueur crépusculaire arrive peu à peu, et le phénomène, faiblissant graduellement, cesse d'être visible.

» D'autres fois, les rayons paraissent encore avec le commencement du jour, même lorsqu'on peut lire sans difficulté le texte imprimé; puis ils disparaissent tout-à-coup, ou bien, à mesure que le crépuscule augmente, ils deviennent vagues, prennent une couleur blanchâtre, et finissent par se confondre avec les cirro-stratus, de telle sorte qu'il devient impossible de les distinguer de cette espèce de nuages. »

Voilà comme la synthèse de ce splendide phénomène; avant d'arriver à l'analyse de ses diverses circonstances ou particularités, nous rapporterons l'observation suivante de lumière polaire boréale observée dans l'hémisphère sud, et décrite par le capitaine Lafond.

« Le 14 juillet 1831, étant par la latitude 45° sud, et par la longitude du centre de la Nouvelle-Hollande, nous vîmes une aurore polaire. Le soleil s'était couché à sept heures trente minutes, mais la nuit se fit seulement à neuf heures, et même longtemps après une grande clarté existait à l'horizon, et à quelques degrés au-dessus dans l'O.-S.-O. 1/4 O., l'amplitude vraie étant ce jour de 30° sud. A onze heures, cette clarté diminua considérablement, et à minuit l'obscurité fut presque complète, le soleil se trouvant alors vis-à-vis la partie la plus sud du globe, par rapport à nous. A minuit et demi, des rayons de lumière parurent dans la partie du N.-E.; ils commençaient à 30° au-dessus de l'horizon, et se dirigeaient vers notre zénith. A une heure, ces rayons devinrent beaucoup plus lumineux et plus brillants, et s'étendirent davantage vers le nord. A deux heures, ils étaient dans leur plus grand éclat, et embrassaient toute la partie du ciel comprise entre le N.-N.-E. et le N.-O. du compas, depuis 20° au-dessus de l'horizon jusqu'à 10 ou 15° au-delà de notre zénith.

» Le temps était clair, le ciel dégarni de nuages, et le vent frais de la partie du S.-O. Les rayons de cette lumière étaient formés par des brouillards ou des nuages unis un peu opaques; elle était plus vive et plus forte dans les endroits où le brouillard semblait le plus épais; là elle avait une couleur rose obscur, qui venait se fondre dans les intervalles à un blanc et à un jaune pâle.

» Ces rayons vacillaient quelquefois, et l'on pouvait alors croire entendre un bruissement qui n'était cependant que l'effet de la vue de ce mouvement sur l'imagination.

» Dans d'autres instants, ces rayons se mouvaient plus lentement, et ressemblaient aux ondulations d'une mer profonde; enfin, pour donner une idée juste de ce spectacle par une comparaison qui, quoique vraie, peut paraitre peu digne d'un effet si majestueux et si grandiose, que l'on se figure un vase rempli d'eau, placé dans une tour formée par de hautes murailles; si le soleil dans un beau jour éclaire la partie de la cour où est placé le vase, son image est alors réfléchie par l'eau qu'elle contient sur la muraille qui est à l'ombre. Si vous remuez le vase, le liquide mis en mouvement réfléchira successivement les rayons du soleil dans toutes sortes de directions.

» La clarté que ces rayons répandaient était assez vive pour qu'on pût lire avec facilité une impression très petite.

» A trois heures du matin, les rayons lumineux disparurent peu à peu, et ils furent remplacés par la clarté du jour naissant qui commençait déjà à paraitre dans toute la partie de l'E.-S.-E.

» Le 15 et le 16, nous vîmes ces mêmes aurores, mais elles ne durèrent pas aussi longtemps et ne furent pas aussi brillantes que le premier jour. »

En enregistrant cette observation dans les *Comptes-rendus de l'Académie*, M. Arago faisait observer qu'il ne pensait pas que personne avant M. Lafond eût vu ces lueurs atmosphériques au nord du zénith par la faible latitude de 45°.

Discutons rapidement les diverses circonstances du phénomène.

Segment obscur. C'est ordinairement le début de l'aurore polaire; il est sombre, quelquefois noir ou d'un gris foncé passant au violet. On distingue facilement les étoiles à travers sa substance sans que leur éclat soit affaibli. M. Struve pense que ce n'est point un nuage, mais seulement le ciel plus sombre. M. Argelander croit au contraire que ce segment est quelque chose de réel. D'autres ont dit

que c'était un nuage qui s'élève du sol pour se transformer en aurore polaire et se dissiper ensuite en légers nuages blancs que l'on retrouve dans le ciel sous la forme de petits *cirro-cumulus*. Le point culminant du segment se trouve ordinairement dans le méridien magnétique, il s'en écarte cependant quelquefois à droite et à gauche; dans certaines régions, cette déviation est même constante et peut s'élever à 11°.

Arc lumineux.—Sa couleur, en général, est le blanc brillant passant légèrement au bleu. Quand le crépuscule dure encore, il est jaunâtre et même un peu verdâtre; sa largeur égale un, deux ou même trois diamètres apparents de la lune; il s'efface à mesure que sa largeur augmente. Plus tard, il n'a plus de limite certaine, son éclat est alors très vif, il illumine tout le ciel. Cet arc lumineux n'est qu'une portion d'un cercle dont chaque spectateur voit une partie différente. On peut, avec M. Hansteen, se représenter tout le phénomène au moyen de ces cercles en cuivre placés près du pôle nord sur nos globes terrestres, et sur lequel les heures sont tracées. Supposons qu'un petit insecte rampe sur le globe en suivant le soixantième parallèle nord, il ne verra qu'une portion de ce cercle, qui lui est caché en grande partie par le globe, et se trouve par conséquent au-dessous de son horizon. Le point le plus élevé de l'arc visible pour lui se trouve juste au nord; s'il se rapproche du petit cercle, il en voit une plus grande portion, et s'il se trouve au-dessous, alors le cercle est à son zénith; s'il se rapproche du pôle et qu'il se trouve au-dedans du cercle, alors le point culminant se trouve au sud. Le milieu de l'aurore correspond probablement au pôle magnétique, et si l'on se trouve à l'est de celui-ci, l'arc sera dirigé du nord au sud, et le point culminant sera à l'ouest: c'est ce qui arrive réellement au Groënland. Au nord de ce pays, l'arc est au sud, ainsi que Parry l'a vu dans l'île Melville. L'arc doit aussi s'élever à mesure qu'on s'avance vers le nord; il doit même paraître quelquefois elliptique, comme plusieurs observateurs de la Scandinavie le disent expressément. Quand l'aurore est très brillante, on voit quelquefois un ou plusieurs arcs plus élevés vers le zénith, et concentriques au premier. On a aussi observé par de grands froids des arcs blancs situés à une grande hauteur, et qui sont peut-être des images de la lumière polaire réfléchies par des particules glacées.

L'arc lumineux n'est pas immobile; bientôt il lance des rayons, une lueur brillante dont la largeur est à peu près celle du demi-diamètre apparent de la lune, et qui s'élancent avec la rapidité de l'éclair vers le milieu de la voûte céleste, se divisent en rayons secondaires dont la teinte est quelquefois verte ou d'un rouge foncé, et prennent l'apparence d'un faisceau lumineux.

Couronne. — Quand les rayons dardés par l'arc lumineux sont très nombreux, et que ces lueurs palpitantes s'élèvent jusqu'au zénith, elles y forment une couronne dont le centre est sur le prolongement de l'aiguille d'inclinaison. Les rayons lumineux et même obscurs qui la composent sont en général parallèles à l'aiguille d'inclinaison; s'ils semblent se réunir dans le prolongement de cette direction, c'est un effet de perspective bien connu. L'arc lumineux lui-même est composé de faisceaux parallèles à cette même direction, et il n'a l'apparence d'une masse lumineuse continue que parce que les intervalles sont remplis par des séries de faisceaux placés les uns derrière les autres.

Étendue et hauteur des aurores boréales. — Il résulte de ce que nous venons de dire sur l'arc lumineux et la couronne, que chacun voit son aurore polaire comme chacun voit son arc-en-ciel, et par conséquent les conclusions que l'on voudrait tirer des observations simultanées faites en divers lieux sur la hauteur apparente de l'arc lumineux, relativement à l'élévation et à l'étendue des aurores polaires sont essentiellement incertaines.

Ce qu'on ne peut au moins révoquer en doute, c'est qu'une même lumière polaire a été aperçue dans des lieux très distants : à Dorpac, par exemple, et à Forly (États-Romains): dans l'île de Sky, 57° 22' lat. nord, à Asti (Piémont), à la Nouvelle-Orléans, à Macao, à Caracas, et même au centre de la Nouvelle-Hollande.

Les anciens physiciens attribuaient aux aurores polaires une élévation supérieure à celle de l'atmosphère ou de 750 kilomètres au moins; les observateurs modernes ont réduit cette hauteur à 150 kilomètres. MM. Christie et Hansteen, en combinant diverses observations de hauteurs prises sur l'arc de l'aurore du 7 janvier 1831, ont trouvé des élévations comprises entre 37 et 192 kilomètres. Des observations parallactiques faites par MM. Bravais et Lottin semblent assigner aux aurores vues à cette époque une limite infé-

rieure de 10 myriamètres environ. Pourquoi n'ont-ils pas discuté les hauteurs mesurées par eux pour les ordonnées de l'arc?

MM. Thienemann, Wrangel et Struve placent les aurores polaires dans une région fort basse; deux ministres protestants, MM Farqhuarson et James Paul, croient même que cette région est celle des nuages. Le capitaine Parry crut voir des jets lumineux provenant d'une aurore se projeter sur une montagne peu éloignée de son bâtiment. En présence de tant de données contradictoires, que conclure? Une seule chose: si l'aurore polaire avait son siége hors des limites de notre atmosphère, elle se mouvrait, comme tous les astres, de l'est à l'ouest: or, des observations nombreuses ont constaté qu'elle restait immobile pendant des heures entières, sans participer aucunement au mouvement apparent des corps célestes, et qu'elle était seulement entraînée vers l'ouest, comme les nuées. Il s'agit donc bien ici d'un phénomène appartenant à l'atmosphère aérienne ou éthérée de la terre. Ce qu'il importe désormais, c'est que, pour déterminer la forme et la hauteur réelles de l'arc, on mesure, toutes les fois qu'on le pourra, l'azimut du point culminant, ainsi que les coordonnées de quatre ou d'un plus grand nombre de ses points.

Fréquence et périodicité des aurores polaires. — Il semblerait résulter des observations faites par la commission française dans le Nord, que la succession de phases par lesquelles passe une même aurore est soumise à une périodicité diurne incontestable qui se manifeste lorsque le nombre des observations est très considérable. Ainsi les arcs, les rayons, les couronnes, ne paraîtraient pas indifféremment ou du moins avec une égale fréquence à toutes les heures de la nuit. Les rayons colorés en rouge et en vert, partie la plus brillante de ce beau météore, se montraient surtout vers dix heures du soir, et leur apparition serait rare après quatre heures du matin; les plaques nébuleuses à lueur cendrée et incessamment variable, domineraient, au contraire, pendant la seconde moitié de la nuit.

Les savants français qui ont séjourné à Bossekop ont vu, du 12 septembre 1838 au 18 avril 1839, cent cinquante-trois aurores boréales, c'est-à-dire qu'il s'est passé peu de nuits sans que ce météore leur apparût.

L'ensemble des observations paraîtrait indiquer qu'elles sont plus fréquentes en hiver qu'en été, et beaucoup plus nombreuses dans

les mois de mars, de septembre et d'octobre que dans les autres mois de l'année.

Très communes de 1707 à 1790, elles devinrent rares, dit-on, pendant les trente ans qui suivirent; depuis 1820, on les revoit plus souvent.

Mais tous ces résultats sont encore incertains, et rien ne prouve que les aurores polaires ne soient pas un phénomène qui, sous certaines circonstances données, puisse se produire à chaque instant, parce que sa cause est permanente.

Nature de la lumière des aurores. — MM. Biot et Brewster ont conclu de leurs expériences que la lumière des aurores polaires est de la lumière directe, qu'elle n'est ni réfléchie ni réfractée. M. le docteur Baudrimont avait cru trouver dans la lumière d'une aurore polaire, observée le 22 octobre 1839, des signes évidents de lumière polarisée par réflexion. M. Arago vit aussi à l'Observatoire quelques traces de polarisation, mais il se garda bien d'en conclure que le mystérieux phénomène se manifestait à nos yeux par de la lumière réfléchie. Pour que cette conclusion devînt légitime, il aurait fallu s'assurer que les rayons provenant de la lune, réfléchis et dès lors polarisés sur les molécules de l'atmosphère terrestre, et qui se trouvaient inévitablement mêlés aux rayons de l'aurore dont on faisait l'analyse, n'étaient pas l'unique source de la polarisation observée. Il aurait fallu tenir compte aussi des effets provenant des réflexions multiples que les rayons de l'aurore elle-même éprouvent dans l'atmosphère. Une détermination exacte du sens et de l'intensité apparente de la polarisation dans divers azimuts, aurait pu trancher la difficulté, mais le temps manqua. Il est évident, d'ailleurs, que les observations seront toujours plus décisives si elles n'ont pas été faites par le clair de lune. Il est bien à regretter que les physiciens de l'expédition scientifique du Nord n'aient pu faire aucune expérience de polarisation, privés qu'ils étaient des appareils convenables.

Circonstances particulières.—On ne peut plus révoquer en doute la connexion intime qui rattache les aurores boréales aux perturbations magnétiques. De nombreuses recherches faites à Paris, et confirmées depuis par des observations sans nombre, ont prouvé que toutes les aurores boréales, voire même celles qui ne s'élèvent pas au-dessus de notre horizon, et dont on ne constate l'existence

que par les relations des observateurs situés dans les régions polaires, altèrent fortement la déclinaison de l'aiguille aimantée, son inclinaison et l'intensité de son aimantation. L'aiguille aimantée est très agitée pendant les aurores; quelquefois elle dévie de plusieurs minutes ou de plusieurs degrés à l'est, revient lentement ou rapidement dans le plan du méridien, qu'elle dépasse pour se porter à l'ouest. Elle est assez tranquille quand l'arc est immobile à l'horizon; mais, dès que cet arc commence à darder des rayons, sa déclinaison change à chaque instant. L'aiguille d'inclinaison est aussi fort influencée; elle s'élève ou s'abaisse avec la couronne. L'intensité magnétique de l'aiguille augmente souvent beaucoup avant l'apparition de l'aurore; mais, dès que l'aurore a commencé, elle diminue d'autant plus que le météore est plus brillant; elle revient ensuite lentement, souvent seulement au bout de vingt-quatre heures, à sa valeur primitive. A Bossekop, lorsque le pôle nord se porte vers l'ouest, l'inclinaison a coutume de diminuer et l'intensité horizontale d'augmenter; l'intensité verticale augmente aussi, mais dans un rapport moindre que ne le fait l'intensité horizontale. La diminution observée de déclinaison est le résultat de ces deux accroissements inégaux. L'observation prouve encore que les forces perturbatrices agissent d'habitude par attraction sur le pôle nord à l'époque où l'aurore parait, et par répulsion vers le milieu ou vers la fin du phénomène. Reste à savoir si les observations simultanées faites sur différents points du globe confirmeront les résultats obtenus par MM. Bravais et Siljistroëm, et que nous venons d'énumérer.

Il sera important aussi de constater si les aurores boréales modifient ou ne modifient pas l'intensité du magnétisme terrestre.

Quelques aurores boréales ont donné des signes évidents d'électricité que l'on a pu recueillir avec l'électromètre. Est-il bien certain que l'électricité recueillie dans ces circonstances n'était pas de l'électricité atmosphérique?

Quelques observateurs ont cru entendre pendant l'aurore boréale un bruit particulier qu'ils comparaient au frôlement d'une étoffe de soie, à la crépitation de l'étincelle électrique, au bruit d'un incendie agité par le vent. MM. Thienemann, en Irlande, et Wrangel, sur les côtes de la Sibérie, n'ont jamais rien entendu. Il en est de

même des physiciens de la commission du Nord, qui affirment qu'aucune des cent quatre-vingt-trois aurores observées par eux ne fut accompagnée d'un bruit quelconque. Quand on les presse un peu, les prétendus témoins de semblables bruits finissent par avouer qu'ils ont adopté l'opinion commune sans examen, et que leur prétendue conviction n'était nullement le résultat d'une observation attentive et défiante. Dans l'observation que nous avons citée plus haut, M. Lafont indique très bien la cause de l'illusion dont les témoins des aurores boréales ont pu être le jouet.

M. Colla croit aussi qu'une aurore boréale observée par lui répandit une odeur propre et désagréable.

Dans tous les pays où l'aurore polaire apparaît souvent, on lui attribue tous les changements de temps qui arrivent; mais les résultats des observations sont si discordants qu'il est impossible d'en tirer quelque conclusion raisonnable. Il semble toutefois que les aurores brillantes, et qui dardent beaucoup de rayons, sont souvent des avant-coureurs de coups de vent et d'une distribution anormale de la chaleur à la surface du globe.

Il arrive enfin assez souvent que l'apparition d'une aurore polaire brillante coïncide avec celle d'un nombre inusité d'étoiles filantes.

Cause des aurores polaires. — Tous les matériaux nécessaires à l'explication raisonnée de cet étonnant phénomène sont loin d'être encore rassemblés, de sorte que la recherche de la cause qui lui donne naissance est certainement prématurée. Disons toutefois qu'il ne semble plus douteux que les courants électriques prennent à la production des aurores polaires une très grande part. Ces quatre grands faits, 1° que le sommet de l'arc lumineux se confond toujours avec le pôle magnétique, ou ne s'en éloigne que de quelques degrés; 2° que le centre de la couronne se trouve sur le prolongement de l'aiguille d'inclinaison; 3° que les rayons dardés qui semblent converger vers le centre de la couronne sont en réalité parallèles à l'aiguille d'inclinaison; 4° que l'aurore polaire exerce une action incontestable sur l'aiguille aimantée; ces quatre grands faits, dis-je, démontrent jusqu'à l'évidence que les courants électriques coopèrent à la formation des aurores boréales et australes.

Ne savons-nous pas d'ailleurs que les courants électriques tendent à se diriger parallèlement entre eux et aux courants de la terre;

que les courants primitifs déterminent par induction des courants parallèles aux premiers, mais dans lesquels l'électricité circule en sens contraire? Or, l'arc lumineux est réellement formé le plus souvent de rayons courts parallèles et verticaux.

Ne semble-t-il pas naturel encore de comparer à des cylindres électro-dynamiques les rayons lumineux toujours parallèles à l'aiguille magnétique, et normaux par conséquent aux courants terrestres?

Quand la flamme s'élance de la pointe de charbon placée au pôle d'une pile n'acquiert-elle pas un mouvement de rotation tout-à-fait semblable à celui des jets innombrables qui, s'élançant de l'arc lumineux, remplissent tout le ciel?

Le pôle magnétique de la terre ne doit-il pas être aussi le point de départ d'un effluve de fluide électrique assez abondant pour produire les effets que nous avons décrits?

La nature entière n'est-elle pas une source immense d'électricité statique ou dynamique? La foudre, les éclairs, etc., ces lueurs si intenses qui illuminent l'horizon dans les nuits d'été, sont le produit de l'électricité statique surabondante. Pourquoi la surabondance d'électricité dynamique ne ferait-elle pas naître les aurores polaires? Et, remarque vraiment importante, les aurores polaires apparaissent surtout dans les régions où les orages et les tempêtes sont fort rares.

Si la lumière polaire donne quelquefois des signes d'électricité statique, ce qui semblerait contraire à sa nature de courant électrique, on expliquera facilement cette anomalie par un excès de tension dans le courant, ou un excès de résistance dans le milieu conducteur. Nous avons vu des piles très énergiques donner naissance à une grande quantité d'électricité statique.

Mais arrêtons-nous; cette digression est ici un hors-d'œuvre, et on nous la reprochera peut-être.

Redisons seulement encore qu'on aurait tort, ce nous semble, de ne pas tenir compte de l'indication de M. Cauchy, qui pense que le mouvement de rotation de l'éther n'est pas étranger à la production de certains météores lumineux.

Nous avions réuni, après de longues recherches, les matériaux qui ont servi à la rédaction de nos deux digressions sur la lumière

zodiacale et l'aurore polaire, lorsque la note suivante, adressée à l'Académie des sciences par M. Colla, directeur de l'observatoire de Parme, et lue dans la séance du 3 février dernier, est venue appeler de nouveau l'attention des savants et des observateurs sur cette classe de phénomènes, et donner plus d'à-propos aux considérations que nous venons de développer.

« En 1829, dit M. Colla, un observateur anonyme écrivait au baron de Zack qu'occupé jour et nuit, depuis six années, d'observations sur la clarté de l'atmosphère, il avait constaté l'existence d'une lueur singulière qui se montrait, la nuit, vers le nord-ouest et vers le sud-est. Cette lueur, qui avait, disait-il, quelque ressemblance avec la lumière zodiacale, en différait en ce qu'elle se montrait dans la direction du méridien magnétique. Toujours plus apparente du côté du nord-ouest que vers le point opposé, elle se montrait quelquefois même par un ciel tout-à-fait couvert, et dans ce cas on eût pu la prendre pour le reflet d'un incendie éloigné. L'auteur de la lettre faisait remarquer que, pour reconnaître la réalité du phénomène, il était nécessaire que l'observateur fût placé de manière à avoir son horizon parfaitement libre, et que de plus il fût exercé à reconnaître de faibles variations dans la clarté du ciel.

» Lorsque je lus cette lettre, j'en fus d'autant plus frappé que, de mon côté, j'avais aussi, dès l'année 1825, observé plusieurs fois ce phénomène, et que j'en avais assez souvent fait mention dans mes registres d'observations. Je l'avais même annoncé à diverses reprises dans des journaux et dans mes annuaires sous le nom de *impressione luminosa verso ponente estivo*. Mes observations différaient, du reste, de celles de l'anonyme en ce que je n'avais jamais vu cette lueur vers le sud-est, et qu'elle ne s'est montrée à moi que très rarement par un ciel nébuleux.

» Des observations faites en juin et dans une partie des mois de mai et de juillet m'ont fait reconnaître qu'il est quelquefois très difficile de constater l'existence du phénomène, attendu qu'à cette époque la lueur en question se confond avec la lumière crépusculaire, qui persiste presque toute la nuit, et avec la lumière zodiacale, qui alors se montre sous la forme d'une zone à l'horizon boréal entre l'est-nord-est et l'ouest-nord-ouest. Une autre circonstance également défavorable à l'observation du phénomène, c'est la vive clarté de la lune.

» Que ce phénomène provienne de toute autre cause que la lumière boréale, c'est ce qui est prouvé incontestablement par plusieurs circonstances : 1° parce qu'il est quelquefois visible pendant toute la durée des nuits d'hiver ; 2° parce qu'il se montre constamment vers le nord ; 3° parce qu'il présente à toutes les époques de l'année sa plus grande intensité lumineuse à peu près dans la direction magnétique. Cette lueur, de plus, ne saurait être confondue avec cet espace blanc, de forme arquée, qui limite le crépuscule du soir et du matin, puisque celui-ci, même dans les circonstances les plus favorables, n'est jamais visible pendant toute la nuit, tandis que l'impression lumineuse dont je parle est quelquefois permanente pendant la nuit entière.

» Dans certaines conditions atmosphériques, cette lueur, que l'on pourrait désigner sous le nom de *lueur magnétique*, se montre plus étendue. De blanche qu'elle est généralement, elle prend une teinte légèrement jaunâtre, et, dans ce cas, elle acquiert d'ordinaire un éclat supérieur ; c'est lorsqu'elle m'est ainsi apparue que je l'ai notée dans mes registres, et annoncée par l'expression que j'ai indiquée plus haut. La forme qu'elle affecte ordinairement est celle d'une zone parallèle à l'horizon, et large de 10 à 12°. Depuis que j'ai à ma disposition une boussole de déclinaison très sensible, qui me permet d'estimer une seconde de variation en arc, j'ai pu constater que les augmentations dans l'intensité de cette lueur correspondent au jour où les perturbations dans la marche de l'aiguille sont plus ou moins sensibles. Il paraîtrait donc que ce phénomène, de même que l'aurore boréale, se rattache aux phénomènes du magnétisme terrestre.

» J'ai dit que dans quelques circonstances rares le phénomène s'observe même dans les nuits nébuleuses ; mais il faut pour cela que la lune ne se montre point, et que le ciel ne soit pas un ciel d'orage. Au reste, la lumière zodiacale, qui est aussi très faible, et qui, sous le rapport de l'intensité lumineuse, se rapproche beaucoup de la lueur dont je parle, apparaît aussi quelquefois à travers les nuages quand ils ne sont pas trop épais ; c'est ce qui a été constaté, par exemple, dans divers lieux de l'Europe, en mars 1843.

» Le singulier phénomène de lueur magnétique qui nous occupe s'est aussi présenté quelquefois à deux savants observateurs,

MM. Quételet et Wartmann, qui l'ont mentionné sous le nom de faible aurore boréale ou d'aurore boréale douteuse. M. Wartmann, par une lettre du 31 mars, m'annonçait cette observation dans les termes suivants : « Depuis le commencement de ce mois, une aurore boréale s'est montrée, le soir, de l'horizon ouest jusqu'aux hyades, toutes les fois que le ciel a été clair, et quelquefois même à travers les nuages quand ils n'étaient pas trop épais. C'est sans doute encore à ce phénomène qu'il faut rapporter l'indication donnée dans le *Traité de météorologie* de Garnier, p. 430 et 431, d'une observation faite aux États-Unis le 17 novembre 1835. »

» Remarquons d'ailleurs que si cette lueur a passé presque inaperçue jusqu'à ce jour, il n'y a pas lieu de s'en étonner beaucoup, puisque, d'une part, elle est toujours très faible ; qu'elle n'est bien visible, pour ceux qui ne sont pas accoutumés à la chercher, que dans des circonstances atmosphériques particulières ; que même, lorsque le ciel est parfaitement dégagé, et que la lune ne brille pas, elle est quelquefois très peu intense ; qu'il faut, en outre, que l'observateur soit placé de manière à n'avoir point son horizon masqué du côté du nord-ouest. J'ajouterai enfin que ce qui arrive pour ce phénomène n'est précisément que la répétition de ce qui a eu lieu pour la lumière zodiacale, dont les observations devraient, à ce qu'il semble, remonter à une époque fort ancienne, tandis qu'on n'en trouve point d'antérieures à celles que fit Cassini en 1683, et que même depuis 1684 personne ne s'en est plus occupé jusqu'au moment où Mairan, vers le XVIIIe siècle, se livra à des recherches sur la cause des aurores boréales.

» En terminant cette note, je dois dire que j'ai déjà cherché à appeler l'attention des savants sur le phénomène dont il est ici question. M. Bianchi, astronome à Modène, a bien voulu, à ma prière, en faire l'objet d'une communication au congrès scientifique qui s'est tenu à Milan l'automne dernier. Il a engagé les astronomes et les physiciens que réunissait cette assemblée à répéter mes observations ; j'adresse aujourd'hui la même demande aux savants français. Si, comme je le crois, ils constatent la réalité du phénomène, j'espère qu'ils voudront bien user des moyens de publicité qui sont à leur disposition pour faire connaître les résultats de leurs recherches, tant sur le fait en lui-même que sur les causes auxquelles on peut le rapporter. »

M. Colla a trouvé que le meilleur moyen de constater l'existence de cette lueur dans le cas où elle est très faible, c'est de se tourner vers la partie opposée du ciel, et de se courber en arrière jusqu'à ce qu'on arrive à voir avec la tête renversée la portion de l'horizon où le phénomène a coutume de se montrer.

L'existence bien constatée du phénomène qui fait l'objet de cette note est, à nos yeux, un fait d'une très grande portée. Nous regrettons seulement que M. Colla, trompé par ce genre de préoccupation d'esprit qui fascine toujours quelque peu les auteurs d'une découverte plus ou moins importante, ait cru devoir combattre les rapports que la lueur magnétique peut avoir avec la lumière polaire ou l'aurore boréale, au lieu d'établir entre ces deux phénomènes un rapprochement qui semblait d'autant plus naturel et plus facile que les preuves par lesquelles le savant directeur de l'observatoire de Parme, étrangement distrait, essaie de mettre en évidence une différence essentielle, sont des preuves frappantes d'identité. La lumière magnétique, dit-il, se montre constamment vers le nord; mais pourquoi a-t-on donné aux aurores magnétiques le nom de polaires ou boréales, si ce n'est parce que l'apparence qui fait comme l'essence de ces aurores se montre presque toujours vers le nord? Qu'on ouvre au hasard un livre de physique quelconque, on y lira toujours que l'aurore polaire apparaît dans la région nord du ciel. J'ai en ce moment sous les yeux le traité de M. Baumgartner, et j'y lis: *Das nord-licht zeigt sich in der nord-gegend*. Mais, dit M. Colla, voici une seconde différence: la lumière magnétique, à toutes les époques de l'année, présente la plus grande intensité lumineuse à peu près dans la direction magnétique. Ne doit-on pas dire, au contraire, que c'est une seconde identité? Le centre du segment, partie principale de l'aurore boréale, et le centre de la couronne, sont précisément dans le plan du méridien magnétique: *dessen mittel punct*, dit M. Baumgartner avec tous les auteurs connus, *im magnetischem meridiane zu liegen scheint*. Enfin, ajoute le patient observateur, la lumière magnétique est quelquefois visible pendant toute la durée des nuits d'hiver. Mais qui oserait dire le contraire de l'aurore boréale? Des observations certaines n'ont-elles pas constaté que pour elle il en est souvent ainsi? M. Colla s'est évidemment mépris; et cela est si vrai, que

MM. Quételet et Wartmann, qui sont, suivant lui, et en réalité, des observateurs fort habiles, ayant vu la lueur magnétique, ne l'ont désignée, suivant M. Colla lui-même, que sous la dénomination de faible aurore boréale ou d'aurore boréale douteuse.

Nous croyons approcher beaucoup plus de la vérité en adoptant des conclusions tout-à-fait opposées. Nous étions depuis longtemps disposé à croire que les aurores polaires étaient un phénomène permanent. Nous l'avons même insinué dans les pages qui précèdent. Les observations de M. Colla ne nous laissent plus aucun doute sérieux, et nous énoncerons sans scrupule la pensée que la lueur magnétique est l'élément permanent des aurores polaires; que ces dernières ne sont, si je puis m'exprimer ainsi, qu'une exagération, qu'une exaltation du phénomène ordinairement plus calme, moins saillant de la lumière magnétique. Recourons à une comparaison pour mieux expliquer notre pensée : l'électricité atmosphérique est sans contredit un phénomène permanent qui se manifeste plus ou moins, qui a ses phases d'intensité faible ou puissante, qui acquiert quelquefois cette violence extraordinaire que nous désignons sous les noms d'orage, de foudre, de trombes électriques, etc., etc. Eh bien, ce qui arrive à l'électricité statique arriverait aussi à l'électricité dynamique, aux courants magnétiques du globe et de l'atmosphère. Elle se manifesterait toujours sous forme de lueur, mais elle aurait ses degrés, ses périodes d'excès; elle arriverait aussi à la tempête, à l'orage, et les périodes d'excès seraient l'aurore polaire dans sa splendeur plus ou moins éclatante. De part et d'autre tout s'expliquerait par des expériences de cabinet. La foudre part comme l'étincelle électrique de nos batteries; elle n'est qu'une étincelle électrique exagérée. De même, les rayons de l'aurore polaire se disposent parallèlement comme nos portions de courants galvaniques, etc., etc. Il restera à chercher quelles peuvent être les causes de cette exagération périodique de la lumière magnétique. C'est quelquefois un nuage extraordinairement électrisé qui amène l'orage et enfante la foudre; pourquoi n'existerait-il pas quelque chose de semblable dans les rayons où se manifeste la lueur magnétique? Les bolides, par exemple, dont l'apparition serait liée, suivant certains observateurs, à celle des brillantes aurores boréales, ne pourraient-ils pas, au centre de ces courants magnétiques si

intenses, faire l'effet des cônes de charbon, lesquels, placés aux pôles d'une pile très forte, produisent un admirable arc lumineux magnétique que l'on a déjà comparé aux aurores polaires?

Mais arrêtons-nous, car nous deviendrions à notre tour le jouet d'une imagination exaltée. Qu'on nous pardonne cependant de hasarder encore une double conjecture qui nous ramène malgré nous à la pensée vague émise par M. Cauchy. Nous inclinons toujours à croire que l'atmosphère éthérée du globe n'est pas étrangère à la production de la lumière magnétique. Je ne sais même quel instinct nous conduit à penser que l'existence du pôle magnétique et la situation vers ce pôle de la lueur observée par M. Colla trouveront un jour leur raison dans l'énorme différence de densité qui existe entre la terre, son atmosphère gazeuse et l'éther. Voilà notre premier rêve; voici le second : Pourquoi la lumière zodiacale ne serait-elle pas, par rapport au soleil, ce que la lumière magnétique est par rapport à la terre? Dès que l'on fera intervenir l'atmosphère éthérée du soleil dans l'explication du phénomène, on ne sera plus arrêté par son étendue si grande, qui ne permettait pas d'admettre qu'il eût sa cause dans ce que l'on pouvait appeler l'atmosphère aérienne du soleil.

Il faut avouer que nous nous sommes égaré dans des régions bien étranges pour un mathématicien; nous en demandons pardon à nos lecteurs.

DEUXIÈME DIFFICULTÉ. — *Raies du spectre.* — *Absorption.*

Quand on a pris soin d'avoir un spectre bien pur, quand la divergence et la largeur du faisceau incident sont aussi petits que possible, quand le prisme est parfait et le spectre assez allongé pour subir dans toutes ses parties un examen rigoureux, on y observe, quand le grossissement est assez considérable, plusieurs particularités remarquables découvertes par l'illustre Wollaston, qui les publia le premier dans les *Transactions philosophiques* de 1802, et qui devinrent plus tard pour Fraunhofer l'objet d'un examen plus approfondi.

Raies du spectre solaire. — Le spectre n'a pas l'apparence d'une ligne continue rouge à l'une de ses extrémités, et violette à l'autre;



il est rayé d'intervalles absolument noirs, et dans les parties lumineuses l'intensité de l'éclairement varie avec tant d'irrégularité qu'elle semble n'être assujettie à aucune loi. Cette irrégularité ne provient pas de circonstances accidentelles, car les lignes se trouvent toujours au même endroit, et gardent entre elles le même ordre et le même rapport, la même largeur proportionnelle et le même degré d'éclat ou d'obscurité, pourvu que l'on emploie toujours la même lumière, celle du soleil, par exemple, et que la matière des prismes soit toujours la même. Si cette dernière condition n'est pas remplie, le nombre, l'ordre, l'intensité des bandes obscures et leur situation par rapport à chaque couleur en particulier, n'éprouvent pas de variation, mais leurs distances respectives changent.

On observe des lignes analogues dans les spectres provenant de la lumière des étoiles, des diverses flammes, de l'électricité, etc.; mais leur disposition est différente pour chaque espèce de lumière. Chaque étoile, chaque flamme, etc., a un système particulier de bandes qui le caractérise en tout temps et en toute circonstance; quelle que soit la modification éprouvée par la lumière que l'on considère, qu'elle ait été réfléchie, réfractée, polarisée, diffractée, etc, les distances des raies obscures ou lumineuses varient seules; leur nombre, leur ordre, leur intensité resteront toujours les mêmes.

La netteté de ces lignes et leur position invariable par rapport aux couleurs du spectre, ou, si l'on veut, la précision des limites des rayons qu'on peut nommer déficients, rend cette découverte d'un prix incomparable en permettant de donner à la détermination des constantes qu'on emploie en optique, les indices de réfraction, les longueurs d'ondulation, etc., etc., une exactitude inconnue jusqu'à nos jours, et presque égale à celles des observations astronomiques.

Cette absence dans les divers spectres d'un certain nombre de rayons définis constitue un premier genre d'absorption qu'il s'agit d'expliquer dans les deux systèmes de l'émission et des ondulations. Examinons d'abord les faits.

Wollaston, avant 1802, mit en évidence dans le spectre formé par un même rayon de lumière diffuse sept lignes qu'il désigna par les lettres A, B, f, C, g, D, E. A était, d'après ses observations, la limite extrême des rayons rouges, E la limite extrême des rayons violets.

Fraunhofer trouva que le spectre formé par la lumière solaire est traversé par une infinité de lignes obscures de différentes largeurs; il compta 590 de ces lignes, et figura 354 des plus prononcées dans une reproduction colorée du spectre qu'il publia. Les raies ne tombent pas aux limites des couleurs, elles se trouvent réparties depuis le rouge jusqu'au violet avec une grande irrégularité: les unes sont très déliées et ne paraissent que comme des lignes noires isolées et à peine visibles; d'autres sont très rapprochées et ressemblent plutôt à une ombre qu'à un assemblage de lignes distinctes; quelques unes enfin très tranchées paraissent avoir une étendue sensible. Fraunhofer a désigné par les lettres A, B, C, E, F, G, H, I, les lignes ou raies plus remarquables. A est une ligne parfaitement tranchée qui se trouve dans le rouge obscur, tout près de l'extrémité du spectre. B et C sont des raies noires tranchées aussi d'une épaisseur appréciable, situées dans la lumière rouge. Entre A et B se trouve un pinceau *a* de lignes très fines qui, réunies, forment une raie. D est une double ligne située au passage de l'orangé dans le jaune; E est un groupe de lignes fines placé dans le vert; F est une forte ligne noire visible dans le bleu; entre E et F, près de E, on voit trois lignes très dessinées *b*, les plus tranchées peut-être du spectre; G est un groupe de traits fins dans le bleu indigo foncé; en H, dans le violet, se trouve une raie remarquable formée de beaucoup de lignes fines et d'une forte ligne moyenne; tout près de là on voit une seconde raie semblable.

Il n'existe pas une seule ligne dans le dessin du spectre donné par Fraünhofer, ni dans le spectre réel qui coïncide avec la ligne C de Wollaston. M. Brewster a trouvé néanmoins que cette raie C peut correspondre à un certain nombre de lignes situées à égale distance entre *b* et E. L'illustre physicien d'Édimbourg conteste l'exactitude du dessin donné par Fraunhofer, qui n'a signalé que 590 raies vraiment sensibles, tandis que lui Brewster a vu nettement ce même spectre partagé en plus de deux mille parties distinctes. Ces différences tiennent sans doute aux circonstances des observations. Certaines raies sont plus ou moins visibles, suivant que le rayon observé est pris dans telle ou telle région du ciel, près de l'horizon, ou près du disque solaire, etc.

Raies des spectres de diverses lumières.—Parmi les faits observés dans diverses lumières, nous signalerons les suivants.

La lumière électrique donne des raies brillantes au lieu de raies noires ; l'une des plus remarquables par sa vive intensité se trouve dans le vert.

La lumière des flammes ordinaires de l'huile, de l'hydrogène, de l'alcool, qui a traversé une fente étroite, montre entre le rouge et le jaune une raie brillante qui se montre à l'œil comme un excès de lumière homogène projeté par la flamme, là où se trouvait d'abord une image jaune de la fente ; de semblables raies, mais moins tranchées, apparaissent dans le vert.

La lumière de Vénus et celle de Mars donnent les mêmes raies que la lumière du soleil : seulement, elles sont moins faciles à distinguer vers les extrémités du spectre.

La lumière de Sirius présente des raies noires distinctes de celles du soleil ; trois de ces raies sont surtout remarquables par leur largeur : l'une apparaît dans le vert, les deux autres dans le bleu. Le spectre produit par la lumière de Castor est assez semblable à celui de Sirius ; Pollux donne beaucoup de lignes faibles, Procyon en offre très peu.

La lumière jaunâtre d'une flamme provenant de la combustion de l'alcool salé très étendu d'eau est sensiblement homogène.

La flamme du cyanogène, quand on la regarde à travers une étroite ouverture, présente une teinte pourpre bordée d'un jaune verdâtre. Lorsqu'on l'observe à travers un prisme, elle forme un spectre divisé d'une manière toute particulière en différentes parties limitées par plusieurs bandes obscures ; ces bandes partagent assez uniformément l'étendue du spectre, et les parties lumineuses présentent toutes à peu près la même intensité d'éclat.

La flamme des feux rouges qu'on obtient en brûlant du nitrate de strontiane présente deux teintes rouges brillantes. Le spectre qu'elle forme au moyen du prisme offre de nombreuses solutions de continuité ; mais la circonstance la plus remarquable est la formation d'une ligne extrêmement brillante d'un bleu vif et absolument distincte de tout le reste.

La flamme de potassium qui brûle dans l'iode donne encore un spectre d'une forme singulièrement remarquable.

La lumière provenant d'un homard qui approche de l'état de putréfaction est d'un vert bleuâtre. Le prisme qu'elle donne est trop

faible pour qu'on puisse distinguer quelque différence de couleur entre le milieu et les extrémités.

Le phosphore brûlant avec du salpêtre donne un spectre dans lequel aucune couleur ne domine, et qui n'est interrompu par aucune ligne sombre : ce spectre est semblable à ceux que l'on obtient avec la chaux ardente, le platine et le plus grand nombre des corps solides.

Le soufre, quand sa combustion est vive, donne une lumière jaune presque parfaitement homogène ; aussitôt que la combustion se ralentit, on voit apparaître dans le spectre des bandes bleues et vertes. Si pour le brûler on le mêle à du salpêtre, on voit dans le spectre une ligne rouge remarquable qui se trouve en dehors des limites du rouge ordinaire, et qui en est séparé par un espace sombre. Sa lumière n'est guère plus réfrangible que les rayons les moins réfrangibles du spectre. Il semble que cette raie soit propre à l'alcali, car on la retrouve dans tous les sels à base de potasse, de même que la combustion des sels de soude donne naissance à une raie jaune.

Raies produites par les absorbants gazeux. — Mais il est un autre ordre de faits qui met mieux en évidence encore l'action des corps qui nous environnent. M. Brewster découvrit le premier qu'une substance gazeuse, l'acide nitreux, produisait plus d'un millier de lignes obscures dans les spectres des flammes ordinaires.

MM. Miller et Daniell ont beaucoup étendu les premières recherches de M. Brewster. Dans leurs expériences, la lumière d'une lampe à gaz, après avoir passé à travers un vase rempli de la vapeur soumise à l'examen, était rendue convergente sur une ligne focale par l'interposition d'un tube rempli d'eau. La bande lumineuse ainsi obtenue était vue à travers un prisme avec l'aide d'une petite lunette dans une position telle que les rayons incidents et émergents faisaient des angles égaux avec la première et la seconde face du prisme.

Lorsque l'air du vase fut légèrement coloré par de la vapeur de brome, on vit la totalité du spectre occupée par plus de cent lignes équidistantes. Quand la vapeur devint plus dense, l'extrémité du spectre disparut, et les lignes devinrent plus fortes dans la partie rouge.

Quand on fit passer la lumière à travers de la vapeur d'iode, on

vit une série de raies équidistantes ressemblant exactement à celles qui avaient été remarquées pour la vapeur de brome, analogie nouvelle et inattendue entre ces deux substances.

En passant à travers la vapeur de chlore, l'extrémité bleue du spectre disparut sans qu'on pût remarquer aucune ligne; mais en ce moment l'appareil n'était pas soigneusement ajusté.

La vapeur d'euchlorine produisit un certain nombre de lignes larges, mais à des intervalles irréguliers, et seulement dans la partie du spectre qui est éteinte par le chlore.

Arrivons maintenant à l'explication des faits, en constatant qu'il résulte des différentes expériences auxquelles Fraunhofer soumit ces diverses lumières, que les raies obscures ou brillantes ont leur origine dans la nature même de ces lumières, et qu'elles ne peuvent être attribuées à l'illusion ou toute autre cause secondaire.

Conjectures diverses sur la nature des raies. — Sir John Herschell a émis l'opinion qu'il n'est point impossible que les rayons manquants dans la lumière du soleil et des étoiles soient absorbés dans leur passage à travers les atmosphères de ces astres.

L'observation suivante, extraite d'une lettre écrite par M. Forbes à M. Arago, en 1836, semblerait renverser de fond en comble cette hypothèse.

« Vous savez qu'il y a transversalement dans le spectre solaire un grand nombre de lignes et d'espaces entièrement noirs. Ainsi, il manque dans la lumière de cet astre des rayons de certains degrés de réfrangibilité. Ces rayons ne sont absorbés ni par le prisme ni par l'atmosphère terrestre. Sir D. Brewster (c'est plutôt sir J. Herschell) suppose que cette perte de rayons s'opère dans l'atmosphère du soleil. Dans cette hypothèse, les rayons provenant du bord du soleil ayant à traverser une plus grande épaisseur d'atmosphère, devraient, décomposés par le prisme, présenter plus de lignes ou des lignes plus larges que les rayons émanant du centre. La dernière éclipse de soleil m'a donné le moyen de me procurer un spectre engendré exclusivement par les bords du soleil : or, j'ai reconnu sans équivoque que ce spectre est parfaitement identique à celui qui résulte de l'ensemble de la lumière de l'astre; conséquemment les rayons manquants ne sont pas perdus dans l'atmosphère solaire. » Cette conclusion est bien brusque.

M. Brewster a dit quelque part que pour approcher encore davantage de l'origine de la lumière l'on pouvait concevoir un rayon éteint dans l'acte même de l'émanation par une molécule, lumineuse ou non, au moyen d'un pouvoir absorbant intense, résidant dans la molécule même, et constituant ainsi un obstacle en lumière à la propagation de ce rayon.

D'autres physiciens ont pensé que la lumière originelle du soleil est continue d'une extrémité du spectre visible à l'autre, et que les rayons qui manquent peuvent être absorbés par les gaz engendrés pendant la combustion par laquelle la lumière est produite.

Explication raisonnée dans les deux systèmes. — Mais quel que soit le mode de génération des raies du spectre, leur existence est d'une grande portée dans les deux théories rivales de la lumière.

Laissons d'abord M. Brewster, dont les sympathies, comme nous l'avons dit plusieurs fois, sont toutes newtoniennes, poser sous ce rapport l'état de la question.

« Dans l'hypothèse newtonienne de l'émission, le fait peut être établi de la manière suivante :

» Quand un faisceau de lumière blanche est transmis à travers une certaine épaisseur d'un milieu particulier, un millier de portions différentes de ce faisceau sont arrêtées dans leur passage en vertu d'une action spécifique exercée sur elles par les atomes matériels du milieu, action qui serait puissamment secondée par la simple application de la chaleur. On conçoit assez bien une semblable affinité spécifique entre des atomes définis et des rayons définis, quoique nous ne puissions pas en déterminer la nature, et nous pouvons la rendre plus facile à admettre en hasardant la conjecture que les particules de la lumière même sont identiques avec les dernières molécules des corps, et que les atomes similaires des deux parts peuvent se réunir de nouveau quand ils sont ramenés dans les sphères de leurs attractions mutuelles.

» Dans le langage de la théorie des ondulations, les mêmes faits peuvent être exprimés ainsi. Des milliers d'ondes différentes, des rayons de lumière de différentes vitesses transversales ou de différentes réfrangibilités, sont incapables de se propager dans tel milieu, tandis que toutes les ondes ou rayons de vitesses et de réfrangibilités intermédiaires sont librement transmis à travers le même



milieu ; c'est-à-dire une onde de lumière rouge large de la 250 millionième partie d'un pouce, et une autre onde de la même lumière large de la 252 millionième partie d'un pouce, sont en état de transmettre librement des vibrations à travers un milieu, tandis qu'un autre rayon rouge, formant la 251 millionième partie d'un pouce, produit des vibrations qui sont entièrement arrêtées par ce milieu. Il n'y a point de fait analogue à celui-ci dans les phénomènes du son, et je ne puis m'imaginer un simple milieu élastique modifié par les particules du corps qui le contient, de manière à former un choix aussi extraordinaire dans les ondes qu'il arrête et qu'il transmet. Nous pouvons supposer, en effet, que l'éther est un milieu composé, consistant en d'autres milieux dont les particules sont les derniers atomes de la lumière, et que les ondulations du même éther dans les corps transparents sont de manière ou d'autre affectés par l'affinité d'atomes similaires dans l'éther et dans le corps qui réfracte. Mais ceci ne fait que reculer la difficulté, et la production d'un pareil système de rayons défectifs par l'action d'un milieu transparent, des gaz, par exemple, forme une difficulté formidable dans la théorie des ondulations. »

« Quelle que soit, ajoute M. Brewster en terminant, l'hypothèse destinée à embrasser et à expliquer cette classe de phénomènes, les faits ouvrent un vaste champ de recherches. A l'aide des gaz absorbants, on peut étudier avec la précision la plus délicate l'action des éléments d'un corps dans toutes leurs variétés de combinaisons, sur des rayons de lumière définis et facilement reconnaissables, et nous pourrons découvrir des analogies curieuses entre leurs affinités et celles qui produisent les lignes fixes dans les spectres des astres. Cependant l'appareil requis pour se livrer avec succès à de pareilles recherches ne peut être employé dans des appartements ordinaires. Des lentilles d'un grand diamètre, des héliostats bien faits, et des télescopes d'une grande ouverture sont absolument nécessaires à cet effet. Mais avec de pareils auxiliaires, il serait aisé de construire des combinaisons optiques, au moyen desquelles on pourrait observer les rayons manquants dans les spectres de toutes les étoiles fixes, jusqu'à celles de dixième grandeur, et étudier les effets de la combustion variable qui répand la lumière devant les soleils des autres systèmes. »

M. Brewster voyait donc dans les faits que nous avons rappelés une objection imposante contre le système des ondulations, et cette objection semblait devenir plus redoutable encore lorsqu'on tenait compte du second genre d'absorption que nous avons déjà étudié, l'absorption par les milieux colorés. Pour M. Herschell, cette objection perdit presque aussitôt l'importance qu'y attachait M. Brewster ; voici, en effet, comment l'illustre savant anglais s'en explique :

« Si, ne considérant, dit-il, que le fait général de l'opposition et de l'extinction que subit la lumière dans son passage à travers les divers milieux, nous venons à comparer la théorie de l'émission et la théorie des ondes, nous trouverons que la différence qui existe dans leur manière de rendre compte des phénomènes de l'absorption est tout à l'avantage de cette dernière ; car, si nous voulons essayer d'expliquer l'extinction de la lumière par le système de l'émission, obligés que nous sommes alors de considérer la lumière comme un corps matériel, nous sommes forcés d'admettre l'anéantissement de la matière : or, qui ne sait que ce fait est impossible ? Mais rien ne nous empêche d'admettre une transformation de la matière, auquel cas il doit nous être permis de chercher parmi les agents impondérables, tels que la chaleur, l'électricité, etc., ce que devient la lumière ainsi réduite à une sorte d'inertie. Le pouvoir calorifique des rayons solaires donne au premier abord un caractère plausible à l'idée de la transformation de la lumière en chaleur par voie d'absorption. Mais si l'on vient à examiner la question de plus près, on la trouve entourée de toutes parts des difficultés les plus grandes. L'on se demande, par exemple, comment il se fait que les rayons les plus lumineux ne soient pas les plus calorifiques, mais qu'au contraire encore l'énergie calorifique soit réservée dans sa plus grande intensité à des rayons qui, relativement à d'autres, ne possèdent que de faibles pouvoirs lumineux. Ces questions, ainsi que plusieurs autres de la même nature, pourront peut-être un jour se résoudre ; mais dans l'état actuel de la science, il est impossible d'y répondre d'une manière satisfaisante. Ce n'est donc pas sans raison que cette question : Que devient la lumière dont les physiciens du siècle dernier se sont tant occupés ? a été considérée comme une question tout à la fois de la plus haute importance et de la plus

grande obscurité par les partisans du système de l'émission. D'un côté, la réponse à cette question fournie par la théorie ondulatoire est simple et directe. La question : Que devient la lumière? se confond avec cette autre question plus générale : Que devient le mouvement? à laquelle les principes admis en dynamique donnent pour réponse qu'il se perpétue à jamais. Rigoureusement parlant, aucun mouvement n'est entièrement anéanti; mais il peut être divisé, et les parties en lesquelles il a été divisé peuvent se faire opposition, et par là même se détruire. Un corps choqué, quoique parfaitement élastique, ne vibre que pendant quelques instants, puis il parait revenir à son état primitif de repos. Mais ce repos apparent, même en ne tenant pas compte de cette portion du mouvement qui peut être détruite par l'air ambiant, n'est autre chose qu'un état de mouvement subdivisé et se détruisant mutuellement, dans lequel toutes les molécules se trouvent agitées par une multitude infinie d'ondulations qui se réfléchissent intérieurement et se propagent en tous sens à travers le corps, étant sans cesse renvoyées par tous les points de sa surface qu'elles viennent frapper successivement. L'on conçoit aisément que la superposition de ces ondulations doit produire à la fin leur destruction réciproque, et que cette destruction doit être d'autant plus complète que la forme du corps est plus irrégulière et les réflexions intérieures plus nombreuses. »

Pressé par les interpellations de Poisson, qui le défiait de rendre compte dans le système des ondulations de l'ébranlement lumineux produit initialement dans une portion d'éther limitée, M. Cauchy a été amené aussi à étudier le phénomène remarquable de la séparation des ondes primitivement superposées, et de leur disparition totale ou partielle. Il a suffi au géomètre de quelques lignes pour jeter un grand jour sur une difficulté presque inabordable; nous les reproduisons, en reprenant la question d'un peu plus haut pour que la solution soit plus facilement comprise.

« On peut voir facilement, dit M. Cauchy, comment s'opère généralement la séparation des ondes planes qui, renfermées dans des plans divers, et offrant des longueurs d'ondulations diverses, doivent être censées superposées les unes aux autres, si l'on veut que leur système représente l'état initial d'une très faible portion d'un

système de molécules circonscrit dans un espace dont les trois dimensions soient très petites.

» Celles des ondes planes qui se trouvent contenues dans des plans divers, ou plutôt les parties de ces mêmes ondes que renfermait primitivement l'espace dont il s'agit, se transportent dans diverses directions indiquées par divers rayons vecteurs de la surface des ondes, et se séparent ainsi de telle sorte qu'au bout d'un temps donné les seules dont la superposition subsiste soient des ondes planes contenues dans des plans très peu inclinés les uns sur les autres, et passant par un même point de la surface des ondes. Ces plans venant à se déplacer ultérieurement, le point de rencontre se déplacera lui-même suivant une certaine droite avec une vitesse de propagation distincte de celle des ondes planes. La série des positions que prend le point de rencontre constitue dans la théorie de la lumière ce qu'on nomme un rayon lumineux. Ajoutons que pour obtenir des ondes renfermées dans des plans très peu inclinés les uns sur les autres, il suffit, dans le cas général, de considérer le mouvement infiniment petit du système de molécules, non à partir du premier instant où ce mouvement est imprimé à une portion du système, mais à partir de l'un des instants qui suivent le premier.

» Quant à la séparation des ondes qui offrent des longueurs d'ondulations diverses, elle ne peut s'effectuer que dans le cas où une différence entre les longueurs d'ondulation entraine une différence correspondante entre les vitesses de propagation, comme il arrive effectivement quand la lumière se propage, non dans le vide, mais dans les corps diaphanes.

» Observons encore que l'état initial d'un système de molécules, ou plutôt d'une portion de ce système, étant arbitraire, le système d'ondes planes qui représente cet état initial, et qui s'en déduit par une formule connue, peut varier à l'infini, comme cet état même. Il en résulte que, parmi les ondes planes correspondantes aux diverses longueurs d'ondulation, les unes doivent être très sensibles, tandis que d'autres peuvent l'être beaucoup moins, et disparaitre presque entièrement. On ne devra donc pas être surpris de voir dans la théorie de la lumière les rayons doués de réfrangibilités diverses lorsqu'on les disperse par le moyen du prisme, offrir des intensités variables, non seulement avec les longueurs d'ondula-

tions correspondantes, mais encore avec la nature des corps dont ils émanent, ou qu'ils traversent ; et l'on devrait s'étonner au contraire s'il en était autrement. Ainsi doivent être évidemment expliquées les raies brillantes et obscures découvertes dans le spectre solaire et dans ceux que fournissent les autres corps lumineux. C'est pour le même motif que la forme et la vitesse des ondes propagées à la surface d'un liquide varient avec la forme de la portion de cette surface primitivement soulevée ou déprimée. »

Qui pourrait nier que cette explication de M. Cauchy ne soit très simple et très naturelle? Les raies du spectre ne doivent pas nous surprendre, leur absence seule dans le plus grand nombre des cas serait un mystère inexplicable!

Même après ces notions si justes et si faciles à saisir, il restait encore un grand pas à faire ; il fallait développer, préciser et démontrer l'idée encore vague de M. Herschell, qui avait ramené la question difficile de l'extinction ou de l'absorption d'un rayon de lumière à celle d'un mouvement subdivisé, et dont les subdivisions se détruisent mutuellement, c'est-à-dire qu'il fallait rattacher la question de l'absorption et des raies au grand et fécond principe des interférences. Or, c'est ce qu'a essayé dans ces derniers mois un savant physicien allemand, M. Erman. Nous allons reproduire avec quelques réflexions critiques le curieux mémoire qu'il a adressé à l'Académie des sciences, et qui a été lu dans la séance du 21 octobre 1844.

« Toutes les fois qu'un faisceau de lumière blanche, en passant d'un milieu dans un autre, se divise en une portion réfléchie et une portion réfractée, la somme des pouvoirs éclairants de ces deux portions est moindre que l'intensité du faisceau primitif. L'acte même de la réflexion et l'acte du passage par un milieu quelconque amènent donc l'un et l'autre une perte de lumière dont la cause, dans les deux cas, est assez vaguement qualifiée d'absorption. Mais, faute d'en avoir étudié les détails, ce fait aussi simple, et qui parait si intimement lié à la cause première de la vision, était demeuré sans explication, et on ignorait même s'il viendrait à l'appui de l'une ou de l'autre des deux théories de la lumière. En effet, si, réfléchie à la surface, ou ayant passé par une couche d'une substance donnée, la lumière nous revient à la fois affaiblie et fortement co-

lorée, est-ce à une affinité chimique, ou, en d'autres termes, à une prédilection inexplicable de cette substance pour certaines espèces de particules lumineuses qu'il faut attribuer ce phénomène, ou bien à des conditions purement dynamiques qui, en calmant certaines ondulations du faisceau primitif, laisseraient subsister les autres? Poser cette question, c'est demander une théorie complète de ce que Newton a appelé les couleurs naturelles des corps. Mais il est très probable que cette même théorie expliquerait encore plusieurs cas où l'absorption affaiblit l'intensité de la lumière comparée sans influer sensiblement sur sa teinte. Il suffirait nommément d'admettre que, dans ces derniers cas, l'absorption, sans différer de cause avec les absorptions décidément colorantes, ait porté sur un plus grand nombre d'espèces de lumières; car, en effet, un assemblage discontinu de rayons doit s'identifier d'autant plus avec de la lumière continue ou blanche que le nombre des lacunes entre ses parties constituantes augmente davantage.

» Il est étonnant que la théorie des phénomènes d'absorption ait encore fait si peu de progrès, puisque la marche des recherches qui devaient y conduire était nettement indiquée d'avance. Il me semble, en effet, que ces recherches doivent se borner : 1° à décomposer, à l'aide de prisme, la lumière sur laquelle l'absorption a agi; 2° à caractériser les rayons qui ont été éteints, par le seul moyen que l'optique nous fournit pour cet effet, je veux dire par la mesure des longueurs de leurs ondes, et 3° enfin, à voir si les longueurs d'ondes des rayons absorbés sont liées par quelque loi qui expliquerait leur disparition.

» Cette méthode me paraît propre à l'analyse de toutes les absorptions, soit que la réflexion ou le passage par un milieu les ait causées. Son application à l'examen des couleurs naturelles dues à la réflexion, aurait cependant un attrait particulier, en ce qu'elle vérifierait de suite l'hypothèse que Newton a émise sur ce phénomène, il y a plus d'un siècle. L'interférence de la lumière réfléchie à la surface, avec celle qui, avant son retour, et suivant la nature de la substance, y aurait plus ou moins pénétré; voilà traduite, dans le langage de la théorie des ondes, la cause que Newton assignait à l'origine des couleurs. Vérifier son hypothèse, c'est donc, comme on le sait, et comme le prouvera aussi l'analyse d'un cas

analogue qui va nous occuper dans la suite, essayer si tout spectre formé par la décomposition d'une couleur contient une ou plusieurs raies obscures ou minima d'intensité, et si, dans le cas de plusieurs minima dans un même spectre, les longueurs d'ondes qui leur répondent sont entre elles dans le rapport d'autant de nombres entiers et impairs.

» De pareilles analyses des couleurs naturelles n'ont cependant jamais été faites ; je me propose de m'en occuper incessamment, et je me borne pour le moment à exposer un travail sur deux cas d'absorption colorante par réfraction.

» Voici d'abord l'énoncé de mes résultats :

» 1° Les couleurs que prend la lumière blanche en passant par des vapeurs d'iode ou des vapeurs de brome sont dues à l'interférence.

» 2° Cette interférence est, dans les deux cas, du genre que je me propose de nommer interférence simple, c'est-à-dire qu'elle résulte de la séparation du faisceau primitif en deux faisceaux seulement.

» 3° Après le passage par l'iode, le retard de l'un des deux faisceaux sur l'autre est de 329 demi-ondulations d'un rayon dont l'indice est de 1,63208 dans un flint qui, pour les lignes C, D, E, F de Fraunhofer, donne les indices de réfractions correspondants 1,62752, 1,63280, 1,63962, 1,64585 : réduit au mouvement de la lumière dans le vide, ce retard équivaut à un intervalle de $0^{mm},09849$.

» 4° Après le passage par le brome, le retard de l'un des faisceaux sur l'autre est de 341 demi-ondulations d'un rayon dont l'indice de réfraction dans le flint ci-dessus désigné est de 1,63249 : réduit au mouvement de la lumière dans le vide, ce retard équivaut à un intervalle $0^{mm},12174$.

» 5° Les stries noires découvertes dans le spectre de la lumière solaire par Wollaston et Fraunhofer, et celles que M. Brewster a fait connaître dans le spectre d'une lumière quelconque qui a passé par l'acide nitreux, ont très probablement la même origine. Mais il faut admettre que tant dans le passage par l'atmosphère qui serait la cause du premier de ces phénomènes que dans le passage par l'acide nitreux, le faisceau primitif se sépare en plus de deux portions différemment retardées chacune.

» 6° Cette dernière hypothèse paraît d'autant plus admissible que,

sous de certaines circonstances de température et de pression, les vapeurs d'iode et de brome opèrent également cette triplification du faisceau primitif, et l'interférence composée qui en est une suite.

» Je passe à la description de l'appareil et des expériences qui m'ont conduit à ces résultats.

» Un excellent prisme de flint de l'atelier de Fraunhofer fut fixé devant l'objectif de la lunette horizontale d'un théodolite de Munich ; un système de vis servait à placer ce prisme tellement que, son arête réfringente étant verticale, il donnait la déviation minimum au rayon qu'il amenait dans l'axe optique du télescope. Le prisme une fois établi, la lunette lui communiquait ses mouvements, sans déranger sa position relativement à l'axe optique. La lumière sur laquelle l'absorption devait agir s'introduisait par une fente verticale, dont la largeur pouvait être indéfiniment réduite à l'aide d'une vis micrométrique. Les distances de cette fente d'entrée au centre du théodolite et à l'arête du prisme étaient connues à un dix-millième près. Je me suis servi tantôt de lumière solaire irrégulièrement réfléchie sur un mur éloigné d'environ 20 mètres, tantôt des rayons émanés d'une lampe à double courant d'air, et concentrés dans le plan même de la fente d'entrée par un réfracteur cylindrique à axe vertical. Pour peu que le temps fût favorable, le premier mode d'éclairage m'offrait dans le champ de la lunette plusieurs centaines des stries dites de Fraunhofer. Les milieux dont le pouvoir absorbant devait être examiné se plaçaient tantôt entre l'observateur et la fente d'entrée, tantôt au-delà de cette fente, et au-delà même du réfracteur, qui alors concentrait le faisceau déjà influencé par lesdits milieux. Quant aux caractères essentiels des spectres qu'ils aident à produire, et nommément à leurs stries perpendiculaires, ces deux emplacements sont tout-à-fait identiques. Le dernier est cependant préférable, en ce qu'il amoindrit les stries horizontales, dues à des endroits opaques ou à d'autres défectuosités accidentelles des vases qui renferment les absorbants.

» Après avoir mesuré l'angle réfringent de mon prisme, il est de 45° 23′ 34″, j'ai employé l'appareil que je viens de décrire à l'étude des absorptions opérées par, 1° l'atmosphère de la terre,



en produisant les stries ou raies dites de Fraunhofer ; 2° l'acide nitreux ; 3° les vapeurs de brome ; 4° les vapeurs d'iode ; 5° enfin des lames minces à surfaces parallèles, soit de mica, soit aussi de verre soufflé. La plupart du temps les différents absorbants furent interposés chacun pour soi ; mais j'ai fait usage aussi de deux à la fois, placés l'un derrière l'autre, sur le passage du faisceau lumineux. Je me suis pleinement convaincu par là que les rayons éteints dans un milieu ne sont jamais rétablis par un autre, et que l'action absorbante de chacun des milieux que j'ai examinés est entièrement indépendante des absorptions que la lumière a éprouvées avant d'y entrer. Dans toutes les parties de mes recherches, l'observation directe se réduisait à mesurer la déviation minimum imprimée par le même prisme à chacun des rayons éteints ou réduits au minimum d'intensité. C'était, en d'autres termes, déterminer la position angulaire du milieu de chaque raie noire qui se présentait dans un spectre donné. L'indice de réfraction e pour chaque rayon éteint se déduisait alors de la formule connue :

$$e = \frac{\sin (A + D + \delta)}{\sin \frac{1}{2} A},$$

où $D + \delta$ désigne la déviation minimum observée, et $A = 45° 23' 34''$, l'angle réfringent du prisme. Si l'on substitue pour D, 33° 40', et si l'on désigne par $E = 1,63207$ l'indice de réfraction qui y répond, la formule précédente devient :

$$e = E + \frac{\cos \frac{1}{2} (A + D)}{\sin \frac{1}{2} A}, \delta . \sin 1' = 1,63207 + 0,00058565\, \delta.$$

» On trouvera ci-après les valeurs de δ que des mesures répétées jusqu'à treize fois sur une même raie et en variant toutes les circonstances accidentelles qui pouvaient tant soit peu influer sur les résultats, m'ont offert dans le spectre de la lumière qui avait passé par les vapeurs d'iode et par celles de brome. Ces résultats prouvent suffisamment que la couleur de ces gaz, loin d'être une couleur simple, se compose, au contraire, d'un nombre étonnant de teintes élémentaires choisies comme par fantaisie et à tour de rôle dans toutes les parties du spectre. Mais comme la marche des nombres δ, et partant aussi la marche des e ou indices de réfraction pour les rayons

éteints qui en dérivent, dépend essentiellement de l'angle et de la substance du prisme qui les a fournis, ces nombres ne sont que d'un faible intérêt pour la théorie. Restait donc, comme nous l'avons prévu plus haut, à traduire ces déviations observées dans les longueurs d'onde qui leur correspondent, ou, en langage algébrique, si L et λ désignent les longueurs des ondes lumineuses dans deux rayons auxquels conviennent respectivement, et pour le prisme en question, les déviations minima D et $D + \delta$, il restait à déterminer la forme et les constantes de l'expression :

$$\lambda = F(L, \delta),$$

ou de l'équation qui lie λ à L et à δ. La condition $\lambda = L$ pour $\delta = o$, permit d'y substituer d'avance :

$$\lambda = L(1 + a\delta + b\delta^2 + \ldots),$$

et il est clair que cette expression doit se borner à d'autant moins de termes que l'on resserrera davantage les limites de son application.

» Voici comment l'observation des raies noires dans le spectre d'une lumière qui a traversé une lame de mica, m'a fourni la relation entre λ et δ.

» Si un faisceau lumineux traverse à angle droit une lame à surfaces parallèles, et d'une substance quelconque, la portion de ce faisceau qui passe directement est suivie d'une autre dont l'intervalle de retard, réduit au vide, est égal au produit de la double épaisseur de la lame par son coefficient de réfraction. L'interférence de ces deux portions éteint comparativement, ou réduit au minimum d'intensité, tous les rayons dont la demi-longueur d'onde, prise pour la substance de la lame, est comprise un nombre entier et impair de fois dans la double épaisseur de la lame. En langage algébrique, ε étant cette épaisseur, et n un nombre entier quelconque, il y aura extinction comparative de tous les rayons pour lesquels :

$$\lambda = \frac{4\varepsilon}{2n+1}.$$

» Il suit de là que :

» 1° L'analyse, par un prisme d'une lumière qui a traversé une

lame de mica ou une autre plaque à surfaces parallèles, doit offrir dans le spectre autant de parties obscures ou comparativement noires que l'équation qui précède comporte de vérifications pour l'épaisseur de cette plaque;

» 2° Que ces bandes ou raies obscures seront d'autant plus nombreuses, plus serrées, et par là même paraîtront d'autant moins tranchées que ε sera plus grand.

» Il va sans dire que chacune de ces prévisions est pleinement vérifiée par l'expérience, car le rayon lumineux qui a traversé une lame de mica donne un spectre sillonné, suivant sa longueur, par des raies perpendiculaires; quoique vu à l'œil nu par la lumière transmise ou la lumière réfléchie, la lame ne présente qu'une blancheur continue. Une plaque de $0^{mm},0452$ est éminemment propre à la reproduction de ces lignes d'absorption. On voit de plus que si, dans le spectre produit par une lame que l'on a choisie au hasard, on marque de o la raie noire dont la déviation minimum $D+\delta$ diffère le moins de D; de 1, la raie noire qui la suit immédiatement, vers la partie violette du spectre, et ainsi de suite jusqu'à la raie marquée m, et déviée de $D+\delta$, chaque mesure d'une valeur de δ offrira une équation de la forme:

$$(1)\quad (2n+1)(1+a\Delta+b\Delta^2+\ldots)=(2n+2m+1)(1+a\delta+b\delta^2+\ldots).$$

dans laquelle δ et m étant connus par l'observation, il ne reste d'inconnus que n, Δ, a, b.

» Quant au nombre de termes qu'il faut garder dans l'expression de λ, et partant aussi dans chaque membre de la dernière équation, je remarque d'abord que l'hypothèse la plus simple, celle où

$$\lambda = L\,(1+a\delta),$$

est réfutée par chacune de mes nombreuses séries d'observations: reprenons, en effet, l'équation

$$(2n+1)(1+a\Delta)=(2n+2m+1)(1+a\delta)$$

et supposons d'abord a négatif, la différence entre deux valeurs consécutives de δ devrait diminuer à mesure que m augmente; en d'autres termes, dans le spectre d'une lumière qui a traversé du mica, les distances angulaires de deux raies consécutives diminueraient du rouge au violet: or, vingt séries de mesures de ces in-

tervalles relatives à autant de lames d'épaisseurs différentes, m'ont constamment donné un résultat contraire. Les intervalles entre deux raies consécutives augmentaient du rouge au violet, et cet accroissement était d'autant plus sensible que la lame absorbante était plus mince. J'avoue même que, frappé de ce résultat inattendu, j'ai cru un instant à une valeur positive du nombre a : cette hypothèse équivaudrait à admettre que dans le mica les ondes de la lumière violette seraient plus longues que celles de la lumière rouge. A l'appui de cette supposition éminemment paradoxale, il arrivait encore que jointe à celle de m négatif, l'équation qui précède offrait une approximation superficielle, il est vrai, mais assez frappante au premier aspect, entre les valeurs de δ calculées et celles qu'avait fournies l'observation. J'ai cru devoir mentionner ce fait, quoique je me sois convaincu depuis que a négatif, et que cette valeur négative joint à une valeur sensible du coefficient b, forme la seule hypothèse admissible. On s'y arrêtera d'autant plus volontiers qu'elle satisfait pleinement et mieux qu'aucune autre à toutes les observations que l'on trouve ci-après. Ce serait seulement si l'on voulait étendre l'expression précitée à des δ plus grands que quarante minutes, que deux coefficients ne suffiraient plus; il faudrait alors leur ajouter un terme en δ^3.

» Restreinte comme nous venons d'en convenir, l'équation qui donne δ devient :

$$(2) \qquad \delta = -\frac{a}{2b} - \sqrt{\left(\frac{a}{2b}\right)^2 - \frac{2m + (2n+1)p}{2m+2n+1} \cdot \frac{1}{b}}$$

dans laquelle $p = -a\Delta - b\Delta^2$.

» Que l'on répète maintenant la mesure des variations δ, non seulement pour les raies marquées $-m$, $+o$, $+m$, dans le spectre d'une lumière qui a traversé une lame choisie au hasard, mais aussi pour les systèmes analogues fournis par d'autres lames de différentes épaisseurs, et soient respectivement μ, μ', ... μ^ν; le nombre des valeurs correspondantes de m et de δ relatives à une de ces lames, il en résultera $\mu + \mu' + ... + \mu^\nu$, équations de la forme 1 ou 2 entre $2\nu + 1$ inconnues. Dans les observations que j'ai soumises au calcul, on avait $\mu + \mu' + ... + \mu^\nu = 96$ et $\nu = 5$. Il y avait donc 96 équations entre douze inconnues, réparties en sorte que

dix d'entre elles, savoir, cinq valeurs de Δ et cinq valeurs de n, n'entraient deux à deux que dans les équations fournies par une même lame, tandis que les deux autres inconnues a et b, dont la détermination formait le vrai but du calcul, se trouvaient l'une et l'autre dans chacune des 96 équations. En résolvant ces dernières d'après la méthode des moindres carrés, j'ai trouvé

$$a = -0{,}0056302,\ b = 0{,}00005580.$$

La relation entre les longueurs d'onde de différents rayons et les déviations minima, $32°\,40' + \delta$, qu'ils subissent dans un prisme de flint de Munich, de $45°\,23'\,34''$, est dès lors

$$\lambda = \mathrm{L}\,(1 - 0{,}0056302\,\delta + 0{,}00005580\,\delta^2);$$

elle équivaut à la relation suivante entre les longueurs d'onde et les indices de réfraction e pour une réfraction quelconque opérée par du flint de Munich

$$\lambda = \mathrm{L}\,[1 - 9{,}6137\,(e - 1{,}63207) + 162{,}685\,(e - 1{,}63207)^2].$$

J'observe toutefois que ces expressions ne doivent pas s'appliquer au-delà des limites $\delta = 35'$ ou $e = 1{,}65258$.

» Voici aussi, pour les cinq séries d'observations, les valeurs de Δ, de n et des épaisseurs ε des lames qui les ont fournies.

I. $\Delta = -0',83,\ n = 128,\ \varepsilon = \dfrac{257\,\mathrm{L}\,(1-p)}{4} = 0^{\mathrm{mm}},025721.$

II. $\Delta = +0',66,\ n = 40,\ \varepsilon = \dfrac{81\,\mathrm{L}\,(1-p)}{4} = 0^{\mathrm{mm}},008099.$

III. $\Delta = -0'80,\ n = 128,\ \varepsilon = \dfrac{257\,\mathrm{L}\,(1-p)}{4} = 0^{\mathrm{mm}},025717.$

IV. $\Delta = -0,71,\ n = 95,\ \varepsilon = \dfrac{191\,\mathrm{L}\,(1-p)}{4} = 0^{\mathrm{mm}},019142.$

V. $\Delta = -8'222,\ n - 120,\ \varepsilon = \dfrac{257\,\mathrm{L}\,(1-p)}{4} = 0^{\mathrm{mm}},025425.$

où p représente la valeur variable d'une série à l'autre de l'expression $-a\,\Delta - b\,\Delta^2$? Quant aux épaisseurs ε, leur rapport suit immédiatement de mes observations, tandis que leur expression en millimètres repose sur la supposition approchée que, à égalité de

rayons, les longueurs des ondes dans le mica et dans le vide sont comme 2 est à 3, ce qui donne pour le mica L = 0mm,00039917. »

Cela posé, M. Erman compare les valeurs observées et calculées de la déviation δ pour un très grand nombre de raies dans de la lumière décomposée après avoir traversé quatre lames de mica différentes et correspondantes à divers indices de réfraction ; nous ne reproduirons pas ici ces tableaux, qui se trouvent dans les *Comptes-rendus de l'Académie*, t. XIX, p. 832 *et suivantes;* voici le résultat de cette comparaison.

« Cette comparaison, dit M. Erman, me paraît suffisamment confirmer la dépendance que j'admets entre les longueurs des ondes lumineuses, les déviations minima, et les indices de réfraction qui leur répondent, les uns pour un prisme de flint de Munich de 45° 23′ 34″, les autres pour une réfraction quelconque opérée par ladite substance. Ce n'est que pour des déviations plus grandes que 33′ 15″, ou pour des indices qui surpassent 1,65258, que les résultats du calcul s'éloignent sensiblement de ceux de l'observation, et qu'il faudrait par conséquent ajouter un troisième terme à la valeur de λ. Je n'ai pas cru pour le moment devoir m'arrêter à la recherche de ce terme, parce que les applications que nous allons faire des valeurs calculées de λ n'excéderont pas les limites où l'expression que j'admets pour cette quantité doit être restreinte.

» Je passe à mes recherches sur l'action absorbante des vapeurs d'iode et de brome. Le raisonnement qui précède me permet de les exposer en peu de mots. Supposer, comme je le fais, que l'absorption opérée par chacune de ces substances équivaut à une interférence simple ou de deux portions de faisceaux lumineux, c'est prétendre que les valeurs correspondantes de Δ et de m offertes par l'observation des raies noires dans le spectre que produit l'absorption de chacune d'elles, satisfait à l'expression

$$\delta = -\frac{a}{2b} - \sqrt{\left(\frac{a}{2b}\right)^2 - \frac{2m + (2n+1)\,p}{2m + 2n + 1}\,\frac{1}{b}},\ p \text{ étant} -a\Delta - b\Delta^2,$$

et dans laquelle il n'y a plus d'arbitraires que les seules valeurs de Δ et de n. En effet, toutes les fois que cette relation se vérifie, il est prouvé que les longueurs des ondes lumineuses dont la réduction à

un minimum d'intensité a produit les raies marquées $-m$, o, $+m$ dans le spectre en question, sont respectivement dans le rapport des nombres $2n+1-2m$, $2n+1$, $2n+1+2m$. Mais cette dernière relation établie, on ne trouvera guère pour l'expliquer une hypothèse plus satisfaisante que celle qui fait le sujet de cette note. Or, voici à quel point la formule précitée satisfait aux déviations minima $D+\delta$, et aux indices e des raies que produit l'absorption des vapeurs de brome. »

Suit le tableau, *Comptes-rendus*, t. XIX, p. 842.

« L'accord du calcul et des observations est d'autant plus parfait que ces dernières reposent sur un plus grand nombre de visées. Il ne laisse à désirer que vers la limite prévue d'avance pour l'étendue de la formule : aussi, circonstance digne de remarque, l'écart qui s'observe près de cette limite est-il dans le même sens que pour des raies dont l'origine par interférence est incontestable. Je conclus des valeurs précédentes de n et de Δ ou p que l'action absorbante des vapeurs du brome est identique avec celle qu'exerce une feuille de mica de l'épaisseur

$$\epsilon = \frac{341\ L(1-p)}{L} = 0^{mm},03390,$$

et que, réduit au vide, l'intervalle de retard que cette substance établit entre les deux portions qu'elle forme du faisceau lumineux qui la traverse est de $0^{mm},10172$.

» Pour l'iode, l'accord du calcul avec l'observation est pour le moins aussi parfait que pour l'absorption par le brome, et les écarts un peu plus sensibles pour les rayons fortement déviés sont encore dans le même sens que dans les phénomènes incontestablement dus à l'interférence. Il suit des valeurs obtenues pour n et Δ ou p que l'action absorbante de l'iode équivaut à celle d'une lame de mica d'une épaisseur

$$\epsilon = \frac{329\ L(1-p)}{4} = 0^{mm},03283,$$

et que cette action établit entre les deux portions qu'elle forme du faisceau lumineux qui la traverse, un intervalle de retard, réduit au vide, de $0^{mm},09849$.

»Outre les raies d'absorption mentionnées jusqu'ici, et dont l'hypothèse d'un retard subi seulement par une portion du faisceau lumineux rend parfaitement raison, les spectres dus au passage de la lumière par l'iode et le brome offrent encore, en de certaines circonstances, une ou deux bandes obscures beaucoup plus larges, et qui paraissent alors se superposer aux raies ordinaires. Leur origine rentre tout aussi bien dans l'hypothèse des interférences, et elles résulteraient nommément d'une troisième portion du faisceau primitif, pour laquelle l'intervalle de retard ne contiendrait qu'un petit nombre de fois la longueur d'une onde lumineuse. En effet, les différents degrés d'intensité lumineuse que l'interférence de deux portions des faisceaux établit dans le spectre du faisceau résultant, doivent, dans ce spectre, passer les uns dans les autres par une progression essentiellement ralentie dans le voisinage des maxima et des minima. Il s'ensuit que chacune des portions noires ou relativement obscures qui s'y présenteront paraîtra d'autant plus large que l'intervalle angulaire entre deux parties de ce genre viendra à augmenter. Ce qui paraît une raie noire de quelques secondes de diamètre, quand l'intervalle entre deux raies consécutives est d'une minute formera donc une bande obscure de plusieurs minutes, quand cet intervalle atteindra ou dépassera même les limites du spectre entier. Or, loin d'être purement hypothétique, cette dernière circonstance est de rigueur toutes les fois que l'intervalle de retard qui produit l'interférence ne contient qu'un petit nombre de fois la longueur d'une onde lumineuse. Admettons, par exemple, que les longueurs des ondes qui, vers l'extrême rouge et vers l'extrême violet, sont les dernières visibles, soient comme 3 est à 2; c'est bien sûrement la plus forte différence que l'on puisse supposer; néanmoins un minimum d'intensité qu'une interférence aurait produit vers le milieu du spectre ne serait alors accompagné d'un autre à l'extrémité même du rouge ou à l'extrémité du violet que si l'intervalle du retard était respectivement plus grand que onze fois, ou plus grand que quinze fois la longueur d'une onde moyenne. Restant au-dessous de cette limite d'étendue, un retard quelconque dans le faisceau que l'on décompose ne produira jamais dans tout le spectre qu'une seule bande dont la largeur et l'aspect délayé ne laisseront pas de se montrer en raison de son isolement.

» Il mérite encore d'être remarqué que dans les vapeurs de brome aussi bien que dans celles d'iode, la séparation d'une troisième portion du faisceau lumineux (je veux dire celle qui n'est que faiblement retardée) devient plus ou moins sensible, suivant la température et la tension de ces vapeurs. Car, en effet, dans les spectres dus à leurs absorptions, les raies minces et serrées gardant invariablement et sous toutes les circonstances un même emplacement, les larges bandes grises s'y ajoutent et les recouvrent en partie toutes les fois que la température ou la compression de l'absorbant s'élevent l'une ou l'autre à une certaine limite. »

Que faut-il définitivement penser de ce mémoire de M. Erman? Le savant physicien allemand a-t-il atteint le but qu'il s'était proposé? Il semble ne pas douter de la légitimité de ses conclusions. Son travail peut-il et doit-il créer la même conviction dans tous les esprits? Nous sommes forcé de dire que non; car, en approfondissant la série des raisonnements sur lesquels M. Erman s'appuie, nous avons reconnu, ce que d'autres auront vu comme nous, qu'elle repose sur un fondement ruineux, et qu'elle ne conclut pas.

Nous ne nous arrêterons pas à combattre la première moitié du mémoire, celle qui a rapport aux lignes d'interférence produites par le passage de la lumière à travers une lame de mica. La partie expérimentale, celle qui contient la détermination directe des déviations minimum des raies, ne mérite que des éloges: c'est une grande et belle expérience de physique.

Nous pourrions, à propos de la partie théorique, exprimer vivement notre juste aversion pour la méthode d'interpolation suivie par M. Erman; pour ces formes téméraires que l'on assigne d'avance, et sans aucune indication raisonnable, aux inconnues; pour ces prétendus résultats d'analyse qui, loin d'être l'expression des lois de la nature et d'amener leur manifestation, ne servent qu'à les déguiser; pour ces solutions incomplètes qui ne rendent que ce que l'on y a mis; qui ne sont en réalité, sous d'autres dehors moins vrais, que les données primitives des expériences prises pour point de départ, mais entraînant avec elles, par la loi inévitable de la continuité, quelques valeurs intermédiaires de l'inconnue. Ce qui constitue la loi de la nature, c'est la courbe déterminée

qui représente l'ensemble des valeurs de l'inconnue; celle, par exemple, décrite par la planète dans son mouvement autour du soleil. Or, le fatal effet des méthodes d'interpolation est de laisser dans le mystère cette courbe réelle déterminée qu'il serait si important de connaître, pour lui substituer les éternelles paraboles indéterminées, arbitraires, qui masquent toutes les lois parce qu'elles ne les renferment pas.

Arrêtons-nous, car ces réflexions pourraient être considérées comme une vaine chicane; des physiciens éminents ont employé avant M. Erman des formules d'interpolation semblables aux siennes; qui pourrait lui contester le droit de marcher sur leurs traces? et d'ailleurs les résultats déduits de cette méthode bien appliquée sont quelquefois un premier pas dans la recherche de la vérité.

Mais voici un reproche plus sérieux. La pensée fondamentale du mémoire de M. Erman est l'identité ou le rapprochement qu'il veut établir entre les lignes d'interférence produites par la lame de mica et les raies engendrées par l'absorption des vapeurs de brome et d'iode, d'où il devait résulter que ces raies ne sont elles-mêmes que des lignes d'interférence. Cette identité était donc le grand fait qu'il fallait démontrer; M. Erman ne le prouve pas *à priori*, il le suppose en étendant aux gaz l'équation fondamentale trouvée pour le mica. Voici son raisonnement : Toutes les fois que cette équation se vérifie, il est une preuve que les longueurs des ondes lumineuses dont la réduction au minimum d'intensité produit les raies marquées $-m$, o, $+m$, dans le spectre en question, sont respectivement dans le rapport des nombres $2n+1-m$, $2n+1$, $2n+1+2m$. Admettons cette conclusion, elle est exacte. Or, ajoute M. Erman, cette dernière relation établie, on ne trouvera *guère* pour l'expliquer une hypothèse plus satisfaisante que celle qui fait le sujet de cette note. Tout cela n'est *guère* rigoureux, mais deviendra convenablement exact si l'on parvient à démontrer par l'expérience la vérité de la supposition. L'a-t-on fait? A ne juger que sur les apparences, on dirait que oui; car l'accord entre les valeurs observées et les valeurs calculées est assez frappant; mais nous craignons qu'il n'en soit rien en réalité, et voici le côté vraiment faible de ces recherches. Si la supposition de M. Erman est vraie, si les phénomènes

d'absorption produits par les vapeurs de brome et d'iode sont identiques avec les phénomènes d'interférence produits par les lames de mica, il faut nécessairement que l'épaisseur de la couche traversée entre dans le calcul des raies, comme l'épaisseur de la lame réfringente entre dans l'évaluation des lignes d'interférence : or, chose singulière, M. Erman, qui a si bien tenu compte de l'épaisseur dans le premier cas, n'en dit absolument rien dans le second. Nous trouvons alors seulement cet énoncé général : L'action absorbante *des vapeurs* du brome est identique avec celle qu'exerce une feuille de mica de l'épaisseur $0^{mm},0339$; l'action absorbante *des vapeurs* d'iode équivaut à celle d'une lame de mica de l'épaisseur 0,03283. Que peuvent signifier ces mots si vagues l'*action absorbante des vapeurs* du brome, de l'iode ? On ne peut y rien comprendre, tant que vous n'aurez pas défini l'épaisseur des couches de ces vapeurs. Car enfin est-ce la simple entrée dans la vapeur qui produit l'effet dont vous parlez, et les choses se passent-elles comme si le milieu était indéfini ? Mais, dans ce cas, ce n'est plus le phénomène de la lame de mica, pour laquelle les raies s'effacent dès que l'épaisseur atteint une certaine limite ; l'échafaudage que vous avez péniblement élevé s'écroule tout entier. Si les raies d'absorption sont dues à l'action successive du milieu traversé, il fallait nécessairement assigner son épaisseur ; il y a donc là une lacune évidente, un vice certain.

Il est un autre passage du mémoire de M. Erman que nous ne nous expliquons pas. Lorsqu'il s'agit des quatre lames de mica qui ont servi à ses expériences, M. Erman nous dit : Quant aux épaisseurs ϵ, leur rapport suit immédiatement de mes observations, tandis que leur expression en millimètres repose sur la supposition approchée qu'à égalité de rayons, la longueur des ondes dans le mica et dans le vide sont comme 2 est à 3, ce qui donne pour le mica $L = 0^{mm},00039917$. Cet aveu est vraiment incroyable. Pourquoi donc M. Erman n'a-t-il pas mesuré simplement les épaisseurs à l'aide du sphéromètre, qui, comme M. Biot l'a prouvé, accuse des différences égales à $0^{mm},002$, ou par d'autres procédés connus ? On aurait alors calculé immédiatement L, et l'on n'aurait pas été réduit à employer le rapport incertain de 2 à 3 dont parle M. Erman. Si au moins il prouvait que l'approximation inconnue de ce rapport

est suffisante pour les conclusions qu'il a cru pouvoir tirer de ses formules !

Quel sera le résumé nécessaire de cette discussion ? Le voici en peu de mots : l'existence des raies du spectre ne constitue pas du tout, dans la théorie des ondulations, une objection formidable ; bien au contraire, ces raies trouvent, dans les premiers principes de cette théorie, leur raison suffisante. Ce qui devrait surprendre dans cette théorie, c'est qu'il n'y eût pas de raies. Il est vrai néanmoins que la science n'a pas encore dit son dernier mot sur leur cause et leur essence ; l'idée de M. Erman est bonne au fond, nous le croyons du moins ; mais elle est loin encore d'être arrivée à l'état de démonstration. Il n'a soulevé qu'un coin du voile, le centre du tableau est encore dans les ténèbres.

Dans l'édition allemande de son mémoire, édition beaucoup plus correcte que celle des *Comptes-rendus*, qui fourmille de fautes graves, M. Erman ajoute cet appendice, que nous enregistrons ici d'avance.

« Les essais qui précèdent prouvent, il me semble, suffisamment, qu'au moins dans deux cas, les couleurs qu'on a désignées sous le nom de *naturelles* se produisent de la manière assignée par Newton comme la plus vraisemblable. Ils montrent en même temps que, dans ces mêmes cas, les lignes obscures ou déficientes du spectre sont une suite nécessaire de la production des couleurs. M. de Wrede avait déjà signalé, dans les *Annales de Poggendorff*, t. XXXIII, p. 353, l'indivisibilité de ces deux effets, la production des couleurs par interférence, et la présence dans le spectre de raies noires également espacées. Mais ce physicien n'avait pas essayé de constater, par des mesures directes, si les raies d'absorption suivaient dans leur disposition la loi que lui avait révélée sa facile et élégante analyse, pour le cas où, conformément à la théorie, elles auraient été le résultat d'interférences. »

SECTION SIXIÈME.

DES COULEURS EN ELLES-MÊMES ET DANS LES CORPS.

Pour jeter sur une question si ardue tout le jour possible, nous commencerons par rappeler en quelques mots ce que la science moderne nous apprend de la constitution du soleil et du spectre solaire. Deux grands maîtres vont nous servir de guide, MM. Arago et Brewster.

CONSTITUTION DU SOLEIL.

Dans son incomparable analyse historique et critique de la vie et des travaux de sir William Herschell, le premier de ces physiciens illustres a rassemblé tout ce que la science a balbutié sur la nature du soleil et de la lumière ; écoutons-le.

Alexandre Wilson admit, dès 1774, que le soleil était composé de deux matières de nature très-différente ; que sa masse était un corps solide non lumineux et noir ; que cette masse énorme était recouverte d'une substance enflammée, fluide jusqu'à un certain point, ressemblant par sa consistance à un brouillard épais.

Bode en 1776, fit du soleil un corps obscur comme notre terre, solide en partie, en partie couvert de liquides, enveloppé d'une atmosphère de vapeurs et d'une atmosphère lumineuse, plus ou moins irrégulières en certains endroits, plus ou moins déprimées en d'autres, ayant leurs vagues, etc.

Mitchell disait, en 1783, que la clarté excessive et universelle de la surface solaire provient probablement d'une atmosphère lumineuse dans toutes ses parties, et douée aussi d'une certaine transparence ; de sorte qu'il résulterait de cette constitution que l'œil reçoit des rayons venant d'une grande profondeur.

Herschell déclara, en 1795, être convaincu que la substance par l'intermédiaire de laquelle le soleil brille, ne saurait être ni un liquide ni un fluide élastique, qu'elle doit être analogue à nos nuages et flotter dans la matière transparente de l'astre. Il place

entre le corps solide du soleil et la couche extérieure de nuages phosphoriques une couche atmosphérique plus compacte, beaucoup moins lumineuse, ou qui même ne brille que par réflexion. Il reconnait que ces deux atmosphères doivent avoir des mouvements tout-à-fait indépendants, et ne parait pas toutefois s'être prononcé d'une manière définitive sur la question de savoir si elles sont en contact immédiat ou si un intervalle les sépare.

Suivant le grand astronome, un fluide élastique d'une nature inconnue se forme incessamment à la surface du corps obscur du soleil, et s'élève dans les hautes régions de l'atmosphère, à cause de sa faible pesanteur spécifique. Quand ce gaz est peu abondant, il engendre de petites ouvertures dans la couche inférieure des nuages réfléchissants : ce sont les *pores*.

Le gaz, en arrivant dans la région des nuages lumineux, est brûlé et se combine avec d'autres gaz ; la lumière résultant de cette combustion n'est pas également vive partout : de là les *rides*.

Les nuages lumineux ne se touchent pas parfaitement ; les interstices qu'ils laissent entre eux permettent de voir les nuages intérieurs à l'aide de la réflexion qui s'opère à leur surface. Cette réflexion étant comparativement faible, le soleil doit paraître peu lumineux dans les régions où elle a lieu. Le mélange de cette faible lumière réfléchie et de la vive lumière excitée par les parties élevées des rides doit donner au soleil une apparence *pointillée* tant qu'on n'emploie pas un très fort grossissement.

Un courant ascendant de gaz, plus fort que les courants générateurs des simples *pores*, donne naissance aux larges *ouvertures*. Si les nuages lumineux ne cèdent pas de suite à l'impulsion de la force qui tend à les séparer, ils s'accumulent près de l'ouverture, et il en résulte des *facules* ou taches lumineuses, rondes ou allongées.

Les courants ascendants les plus intenses diviseront sur une grande étendue l'enveloppe continue que forment les nuages inférieurs ; ils divergeront en continuant à s'élever entre les deux couches, et opéreront dans l'atmosphère lumineuse une éclaircie plus étendue encore. Dans le voisinage de cette éclaircie, certaines parties du courant ascendant iront fournir un nouvel aliment à la combustion : de tout cela résulteront des *noyaux*, des *pénombres* et des *facules*.

M. Arago termine ainsi ce résumé rapide : « S'il m'était permis de sortir du cadre de cette notice, des phénomènes de polarisation permettraient, en plus d'un point, de substituer des faits positifs, des démonstrations catégoriques aux raisonnements simplement bégayés par Herschell. » Et en effet, l'étude que M. Arago a faite de la lumière solaire au moyen de son polariscope l'a forcé d'admettre que cette lumière provenait, non d'un corps solide incandescent, mais d'une masse gazeuse.

Disons en passant que Bode et Herschell ont cru le soleil habité. Suivant Herschell, si la profondeur de l'atmosphère solaire dans laquelle s'opère la réaction chimique lumineuse s'élève à un *millier* de lieues, il n'est pas nécessaire qu'en chaque point de la surface du noyau du soleil l'éclat surpasse celui d'une aurore boréale ordinaire. Le noyau solaire peut d'ailleurs n'être pas très chaud malgré l'incandescence de l'atmosphère lumineuse.

Le docteur Elliot, qui peuplait aussi le soleil d'habitants, soutenait, dès 1787, que la lumière du soleil provenait de ce qu'il appelait une aurore dense et universelle.

La portée de ce rapprochement sera mieux comprise après les longs développements dans lesquels nous sommes entré au sujet de l'aurore boréale ; on verra comment la lumière et la chaleur solaire peuvent trouver leur source dans des courants électriques.

Parce que les rayons du soleil nous semblent vraiment brûlants dans certaines circonstances, nous nous imaginons que sa température est excessivement élevée, qu'elle est bien supérieure à celle des corps incandescents que nous observons sur la terre ; et nous avons raison dans le jugement que nous portons : j'ai entendu néanmoins un physicien instruit, mais quelque peu paradoxal, affirmer que cette analogie n'avait aucun fondement. « Il est plus probable même, disait-il, qu'elle est inadmissible. » Lors même que la température du soleil ne serait pas excessivement élevée, le flux continuel auquel sa présence donne naissance suffit à expliquer tous les phénomènes dont nous sommes témoins, pourvu que l'on admette que la quantité de chaleur perdue diffère d'une quantité finie, mais d'ailleurs aussi petite que l'on voudra, de la quantité de chaleur reçue. Un filet d'eau aussi mince qu'on pourra le concevoir finira, si on le suppose vraiment continu, par remplir le plus vaste bassin. Les rayons calorifiques solaires ne produisent

des effets énergiques que par leur accumulation. La condensation qu'ils éprouvent dans l'atmosphère suffit à nous échauffer fortement au niveau des mers ; mais cette même condensation est inefficace sur les hautes montagnes. Et là même, cependant, l'illustre Saussure a fait bouillir de l'eau en l'exposant aux rayons à peine tièdes du soleil, en s'aidant d'un artifice extrêmement ingénieux, qui consistait à placer l'eau dans un vase tellement enveloppé que la déperdition de chaleur devenait impossible.

Rien n'empêcherait donc, concluait le physicien dont nous parlons, que la chaleur à la surface du soleil fût très tolérable, ainsi que l'éclat lumineux. Nous accepterions avec beaucoup de peine cette idée par trop paradoxale. Arrivons maintenant à l'analyse du spectre solaire suivant Newton et Brewster.

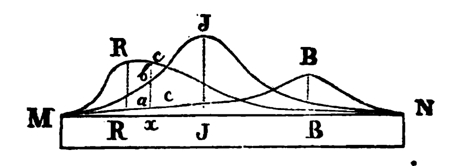
CONSTITUTION DU SPECTRE SOLAIRE.

Avant les curieuses recherches du savant physicien écossais, on admettait : 1° que la lumière blanche du soleil est composée de rayons diversement colorés, parmi lesquels on distinguait surtout sept nuances, *violet*, *indigo*, *bleu*, *vert*, *jaune*, *orangé*, *rouge* ; 2° que chacune des couleurs du spectre était une couleur simple ; 3° que les rayons diversement colorés sont diversement réfrangibles.

Sir David Brewster prétend au contraire : 1° que la lumière solaire est composée de trois couleurs simples, le rouge, le jaune et le bleu ; et que le spectre solaire, produit, soit par des prismes de substance translucide, soit par des rainures pratiquées dans des surfaces métalliques ou transparentes, se forme de trois spectres d'égale longueur qui commencent et se terminent aux mêmes points, savoir, un spectre rouge, un spectre jaune, un spectre bleu ; 2° que toutes les couleurs du spectre solaire sont composées, chacune d'elles se formant de lumière jaune, rouge et bleue en diverses proportions ; 3° que la différence de couleur n'entraîne pas la différence de réfrangibilité, c'est-à-dire qu'on ne peut plus admettre avec Newton que la même couleur ait toujours la même réfrangibilité, ou que le même degré de réfrangibilité appartienne toujours à la même couleur.

La figure ci-jointe représente, dans les idées de M. Brewster, la

combinaison des trois spectres. Les ordonnées ax, bx, cx des différentes courbes représentent au point x les intensités respec-



tives des rayons rouge, jaune et bleu. Le spectre rouge a son maximum d'intensité en R, le jaune a son maximum d'intensité en J et le bleu en B; ces trois maxima sont représentés par les ordonnées RR, JJ, BB.

De l'hypothèse de M. Brewster une fois admise, il résulte qu'en chaque point du spectre il existe nécessairement trois couleurs qui, par leur mélange, forment une teinte composée, et qu'il est impossible de séparer par la réfraction prismatique, parce que ces trois rayons, quoique diversement colorés, ont en ce point la même réfrangibilité. On ne pouvait donc espérer de démontrer cette hypothèse qu'en analysant la teinte composée résultant des trois rayons, au moyen de corps transparents, solides ou liquides, qui, absorbant un ou deux des rayons simples et laissant passer les autres, pouvaient séparer ou mettre en évidence un ou plusieurs des rayons simples. C'est, en effet, le genre de démonstration essayé par M. Brewster : suivons-le dans ses raisonnements.

« I. Il résulte, dit-il, de la simple inspection des espaces colorés que la lumière rouge existe dans les divisions rouge, orangée et violette du spectre. Mais, d'après les mesures de Fraunhofer, ces trois divisions occupent 190 parties sur 360 de la longueur totale du spectre; les rayons rouges se trouvent donc dans plus de la moitié du spectre total. Si nous examinons les espaces bleu et indigo au travers de certains liquides jaunes, tels que l'huile d'olive, ils prennent une teinte violette bien distincte; en sorte que ces liquides doivent avoir absorbé quelques rayons qui avaient neutralisé ou masqué le rouge. La lumière rouge existe donc dans les espaces bleu et indigo; et comme je montrerai bientôt que la lumière blanche, qui renferme nécessairement le rouge, peut être séparée

des espaces vert et jaune, il s'ensuit que la lumière rouge existe dans les sept espaces colorés qui partagent le spectre.

» II. La couleur jaune se retrouve distinctement à l'œil dans les espaces orangé, jaune et vert, qui occupent 77 parties du spectre. Lorsqu'on examine le spectre avec un verre bleu foncé, la lumière verte est vue distinctement en F, qui est l'une des lignes de Fraunhofer; et comme une lame verte de gélatine transparente produit une bande blanchâtre au-delà de F, et dans l'espace bleu, il est clair qu'une portion de lumière jaune doit s'y trouver. Nous avons déjà vu que l'action de l'huile d'olive dans les espaces bleu et indigo est d'absorber certains rayons et de laisser une teinte violette; ces rayons ne peuvent pas être rouges, et ils ne sont pas bleus, parce que le blanc enlevé du bleu ne laisserait pas du violet; ils doivent donc être une petite portion de rayons jaunes qui, formant du blanc avec le rouge et une portion de bleu, ont pour effet d'affaiblir la teinte bleue prédominante. L'existence simultanée des rayons jaunes et rouges dans les espaces bleu et indigo peut être déduite d'une autre expérience. Si nous transmettons le spectre au travers d'une certaine épaisseur d'une solution bleue de sulfate de cuivre et d'ammoniaque, les espaces bleu et indigo paraissent être fort affaiblis par la lumière blanche, c'est-à-dire que le bleu paraît être mêlé avec le rouge et le jaune.

» Maintenant, si cette lumière bleue, qui paraît être affaiblie, était un bleu pur et homogène qui ne contînt ni rayons rouges ni rayons jaunes, elle ne subirait pas plus de diminution en passant au travers d'une épaisseur additionnelle de sulfate de cuivre et d'ammoniaque que ne le ferait de la lumière blanche en passant au travers de la même épaisseur de cristal ou d'eau pure, c'est-à-dire qu'elle ne subirait aucun changement appréciable : or, en passant au travers de la solution de cuivre, le bleu devient promptement plus foncé et moins blanc, ce qui ne peut provenir que de l'absorption des rayons rouges et jaunes, qui lui donnaient une apparence de blancheur.

» Pour bien saisir la force de cet argument, il faut considérer que, bien qu'un liquide rouge ou bleu foncé paraisse opaque par rapport à la lumière blanche dont il absorbe les rayons, sauf les rouges ou les bleus, cependant il peut être regardé comme parfai-

tement transparent par rapport à la lumière bleue ou rouge qui le traverse librement. Rien n'est plus remarquable pour ceux qui font l'expérience pour la première fois, que l'imperceptible diminution d'intensité que subit un rayon de lumière rouge homogène en passant au travers d'une grande épaisseur d'un liquide rouge, particulièrement quand le rayon primitif est produit par la transmission au travers du même liquide rouge. — Un grand nombre d'expériences démontrent que la lumière jaune existe dans toutes les parties de l'espace rouge du spectre. En se servant d'un prisme de vin d'Oporto, de 30°, ou en regardant le spectre au travers d'une certaine épaisseur de baume de soufre, de baume du Pérou, de poix, ou de mica rouge, on peut voir directement la lumière jaune à la ligne marquée C par Fraunhofer, qui est assez avancée dans l'intérieur de l'espace rouge; et par l'action absorbante de ces quatre dernières substances, la totalité de l'espace rouge prend une teinte jaunâtre provenant de l'absorption de la lumière bleue. Le même effet est produit, mais d'une manière moins frappante, lorsqu'on transmet la lumière de l'espace rouge au travers de certaines lamelles transparentes jaunes, orangées et vertes, qui, absorbant toutes de la lumière bleue, donnent à tout l'espace rouge une teinte orangée, c'est-à-dire une teinte contenant de la lumière jaune. A l'appui de l'opinion qu'il existe des rayons jaunes dans toutes les parties de l'espace rouge, on peut citer une observation de sir Herschell, qui eut occasion de voir le spectre prismatique réfléchi par du cuivre poli. La couleur du cuivre donnait aux rayons rouges l'apparence de l'orangé; la couleur orangée était elle-même différente de ce qu'elle doit être.

Il résulte de ces faits que la présence de la lumière jaune peut être constatée dans tous les espaces colorés, sauf le violet, où je n'ai pu encore la trouver, ce qui ne doit pas surprendre, si l'on prend en considération la grande faiblesse des rayons violets, et la facilité avec laquelle ils sont absorbés par des milieux de presque toutes les couleurs. Le sulfate bleu de cuivre ammoniaqué absorbe presque la totalité de l'espace violet, et le verre bleu azuré à peu près la moitié; en sorte qu'il est extrêmement difficile de le soumettre à l'action partielle des meilleurs absorbants.

» III. Il est évident même pour l'œil que la lumière bleue existe dans les espaces violet, indigo, bleu et vert qui occupent 247 parties

du spectre, c'est-à-dire plus des deux tiers de sa totalité. Quand les rayons les plus réfrangibles sont absorbés par une certaine épaisseur de baume de soufre, de baume du Pérou, de poix, ou de mica rouge, le bleu mêlé avec le jaune, et formant le vert, peut être distingué très près de la ligne C de Fraunhofer, qui est fort avancée dans l'espace rouge. L'existence du bleu dans tout l'espace rouge est démontrée par les mêmes arguments qui ont servi pour la lumière jaune; car, quand l'espace rouge prend une teinte orangée par l'action absorbante de certains milieux jaunes, orangés et verts, le changement ne peut être dû qu'à l'absorption de la lumière bleue. »

IV. M. Brewster cherche ensuite à compléter sa démonstration en montrant que la lumière blanche peut, dans toutes les parties du spectre, être séparée des autres couleurs.

« Quand nous regardons, dit-il, le spectre au travers d'un verre bleu d'une certaine épaisseur, nous isolons l'espace jaune, qui paraît alors d'une teinte très riche. Si l'on augmente l'épaisseur du verre, ce jaune composé prend la teinte pâle, couleur paille, de la flamme monochromatique produite par la combustion de l'alcool étendu d'eau salée. Une épaisseur encore plus grande du verre produit une bande d'un blanc verdâtre qui devient d'un blanc rougeâtre si l'on change le bleu du verre. Si maintenant on mêle une solution de sulfate de cuivre qui agit sur les rayons du côté rouge de l'espace jaune avec de l'encre rouge délayée qui agit sur les rayons du côté bleu du même espace, on réduira les rayons de cet espace jaune à une lumière presque blanche, avec une légère teinte de vert quand le sulfate de cuivre sera en excès, et une légère teinte de rouge quand ce sera l'encre rouge. La séparation de la lumière blanche peut très bien être effectuée au moyen de quelques verres bleus azurés, et dans quelques cas la pureté de la lumière peut être augmentée par une solution de sulfate de cuivre et de fer, ou même par un verre vert. La lumière blanche mise en évidence peut être rendue jaune par le moyen d'une lamelle jaune transparente qui absorbe quelques uns de ses rayons bleus, et elle peut être rendue verte par une lamelle verte transparente qui absorbe quelques uns de ses rayons rouges. Il résulte de ces expériences que la lumière blanche, composée de rayons rouges, jaunes et bleus, existe dans les parties les plus lumineuses du spectre, et peut être séparée par l'absorption de la por-

tion de lumière jaune ou d'autre couleur qui excède ce qui est nécessaire pour former la lumière blanche. Un prisme d'un grand pouvoir dispersif ayant été employé, ce fut une chose singulière et particulièrement intéressante que de voir pour la première fois un rayon de lumière blanche formé de rayons rouges, jaunes et bleus d'égale réfrangibilité, et ne pouvant être analysé par la réfraction prismatique. »

Un autre procédé d'absorption a permis à M. Brewster de séparer la lumière blanche dans l'espace orangé et l'espace vert.

Voilà les arguments apportés par M. Brewster en preuve de son hypothèse ; sont-ils vraiment concluants, et l'illustre physicien a-t-il été aussi bon logicien qu'il est habile observateur ? Nous ne le pensons pas ; nous sommes, au contraire, forcé d'admettre que cette série de raisonnements repose, en réalité, sur des abus de mots, et que sa démonstration n'est au fond qu'un paralogisme. Entrons à ce sujet dans quelques détails.

Et d'abord, avant d'employer sans cesse les mots blanc, rouge, bleu, etc., il faudrait les définir ; ils sont susceptibles d'une multitude d'acceptions : il y a blanc et blanc, bleu et bleu, rouge et rouge... M. Brewster le sait mieux que tout autre, puisqu'il croit avoir trouvé un blanc indécomposable par le prisme, etc. L'abus de mots dont je me plains consiste précisément dans l'emploi de termes non définis, et que l'on prend sans raison dans une acception favorable au système que l'on a adopté d'avance, tandis qu'ils sont susceptibles de significations diverses. Ainsi, par exemple, quand M. Brewster dit, sans avoir l'air d'y prendre garde, *qu'il résulte de la simple inspection des espaces colorés que la lumière rouge existe dans les divisions rouge, orangée et violette du spectre ;... que la couleur jaune se retrouve distinctement à l'œil dans les espaces orangé, jaune et vert ;... qu'il est évident pour l'œil que la lumière bleue existe dans les espaces violet, indigo, bleu et vert*, etc., etc., on a droit de l'arrêter tout court et de révoquer en doute des assertions qui sont vraiment gratuites. Que peuvent-elles, en effet, signifier ? Une seule chose, évidemment, c'est que la sensation de la lumière orangée a quelque analogie avec celle de la lumière rouge, que la seconde rappelle un peu la première, que les deux sensations produites ont entre elles un certain rapport, etc., etc. ; mais en peut-on

conclure que la lumière orangée contient du rouge à l'état de rouge? évidemment non. Au contraire, puisque ces deux lumières dans le spectre, à l'état où elles se présentent à nous, diffèrent réellement par des caractères extérieurs, la sensation produite et la réfrangibilité; par des caractères essentiels, la longueur d'ondulation, nous devons affirmer que l'une n'est pas l'autre, et n'est pas formée de l'autre.

C'est bien pis encore quand M. Brewster, arrivé par une série d'opérations à une certaine couleur, lui donne simplement le nom de bleue, de verte, de blanche : la témérité est alors beaucoup plus grande. Il devrait se contenter de dire : la lumière à laquelle je suis parvenu a quelque analogie avec la lumière blanche, puisque les sensations produites par ces deux lumières ont entre elles quelque ressemblance; tout ce qu'il ajoute est affirmé gratuitement, on a le droit de le nier. Ainsi, la lumière blanche dont l'apparition l'a tant étonné, et dont la découverte est vraiment un fait curieux, avait, il l'avoue, une teinte verdâtre, ce n'était donc pas du blanc pur; ce n'était certainement pas même du tout du blanc, en prenant ce mot dans son acception reçue; et la preuve, c'est que cette lumière n'était pas décomposée par le prisme.

Ces considérations me semblent prouver déjà d'une manière certaine que les prétendues démonstrations de M. Brewster n'offrent rien de sérieux, qu'on n'a pas même le droit de conclure de ses recherches que la différence de couleur n'est pas une preuve de la différence de réfrangibilité, ce que beaucoup de physiciens affirment actuellement avec tant de légèreté; et en effet, tant que les couleurs n'auront pas été définies autrement qu'elles ne l'ont été jusqu'ici, les sept couleurs principales seront toujours celles qui, transmises par tel prisme de telle substance, sont réfractées de telle manière, déviées de telle quantité, présentent en un mot telle réfrangibilité; le blanc ne cessera pas d'être la réunion dans des proportions connues de ces sept couleurs fondamentales. On pourra, il est vrai, affirmer qu'il est certaines couleurs produisant des sensations analogues à celles que causent les couleurs orangé, vert, indigo, violet, etc., et qui sont, non de la lumière simple, mais des mélanges dans certaines proportions de rouge, de bleu et de jaune; que certaines couleurs causant une sensation analogue à celle du blanc sont à peu près in-

décomposables par le prisme ou résultent elles-mêmes de la superposition de certaines quantités de rouge, bleu, jaune. Mais de là à l'assertion de M. Brewster, qu'il n'y a dans le spectre que trois couleurs réellement distinctes, il y a une distance infranchissable.

Le paralogisme consiste encore à se servir de l'absorption sans savoir en quoi elle consiste et quel est son effet essentiel. La lumière transmise est-elle la lumière primitive simplement tamisée, qui a perdu seulement quelques uns des éléments qui, par leur mélange, lui donnaient naissance? N'est-ce pas plutôt cette même lumière plus intrinsèquement modifiée, ou bien encore n'est-ce pas une lumière nouvelle? Il fallait d'abord résoudre ces graves questions avant de rien affirmer, ce qui n'est pas possible dans l'état actuel de la science, puisque partout les doutes et les ténèbres surabondent. Ici donc encore M. Brewster a manqué de prudence.

Un exemple bien frappant jettera une nouvelle lumière sur cette discussion, et fera mieux ressortir encore le défaut de logique que nous signalons. Tout le monde sait que lorsqu'un corps sonore est mis en vibration et rend un son déterminé, ses vibrations se transmettent par communication de mouvement à ceux des corps environnants qui sont placés dans des conditions favorables, de telle sorte que ces corps rendent eux-mêmes des sons propres. Nous avons vu répéter hier cette expérience dans des proportions vraiment étonnantes. M. Marloye, qui a déjà tant enrichi la science du son d'instruments précieux, a fait construire un diapason qu'on pourrait appeler diapason-monstre, haut de 50 centimètres, lourd de 52 kilogrammes, et qui, frotté par un archet, rend le son ut_1 d'un bourdon de 8 pieds, correspondant à 128 vibrations. L'intensité de cet ut_1, renforcé par une masse d'air proportionnée, est véritablement formidable, et le son du tuyau d'orgue ne peut nullement, sous ce rapport, lui être comparé. On s'assure d'ailleurs facilement que ce que l'on perçoit est vraiment un son simple résultant d'un système unique de vibrations, dont les harmoniques ne ressortent pas du tout. Or, pendant que cet *ut* résonnait, plusieurs des vitres de l'appartement résonnaient elles-mêmes; l'une d'elles, entre autres, rendait un son éclatant. Admettons que ce son, qui avait évidemment un rapport simple avec le son ut_1 fût, par exemple, la_3, ou la quarte à la double octave : le son ut_1 transmis

par la vitre est donc devenu le son la_3. Qu'en conclurait le physicien qui raisonnerait à la manière de M. Brewster? Que le son ut_3, loin d'être un son simple, est un son certainement composé, renfermant au nombre de ses composants le son la_3. Ce serait évidemment une grossière erreur que personne, sous cette forme, ne voudrait accepter, et voilà cependant l'illusion dont le savant physicien anglais n'a pas voulu se défendre.

Non, la couleur jaune qui apparaît dans la lumière qui a traversé, par exemple, une certaine épaisseur de vin d'Oporto, n'était pas plus renfermée dans le rayon primitif rouge, que le son la_3 de la vitre n'est renfermé dans le son simple ut_3 du diapason-monstre. Ce jaune, au contraire, est un rayon lumineux nouveau, dépendant à la fois et du rayon primitif rouge, et du milieu coloré qu'il a traversé, comme le son la_3 est un son nouveau dépendant à la fois du son primitif ut_3, des dimensions et du degré de tension de la vitre, etc., etc.

Cette vérité ressortira bien plus encore quand nous aurons développé la théorie des couleurs adoptée par Euler, et confirmée par M. Arago. Ce que nous venons de dire suffit, il nous semble, pour condamner sans retour le moyen d'analyse par les corps absorbants que M. Brewster a osé accepter et conseiller dans ses recherches sur la composition du spectre solaire. Que Newton, en voyant la lumière, par son simple passage à travers un corps limpide, transparent, dépourvu par conséquent de toute action perturbatrice sensible sur le mouvement lumineux, se tamiser et se partager en un nombre indéfini de rayons diversement réfrangibles, affirme sans crainte que le rayon de lumière blanche était un rayon composé ou formé de la réunion d'autres rayons simples, ou peut-être même aussi composés, parmi lesquels l'œil distingue surtout sept couleurs bien tranchées : nous comprenons cette conclusion, nous admettons sans objection aucune ce procédé d'analyse.

Que pour étudier un bruit ou un son formé de la réunion de plusieurs autres sons, on fasse, avec M. Savart, réfléchir ce bruit par une paroi solide dont l'action extinctive et la résonnance propre puissent être complétement négligées, et qu'alors que par l'acte même de la réflexion les mouvements simples de longueurs d'ondulations différentes se seront séparées, on prononce que ces ondes

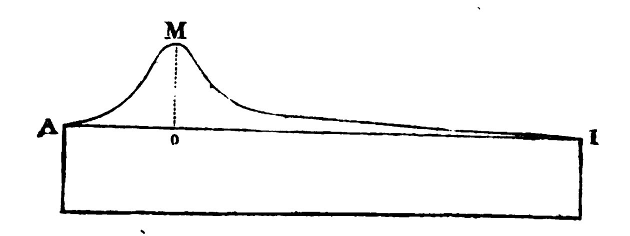
élémentaires sont précisément les composantes du son ou du bruit primitif : nous ne nous refuserons pas à une déduction si naturelle, nous applaudirons à cette ingénieuse manipulation.— Mais que pour analyser la lumière on la soumette à l'action de milieux capables d'une sorte d'illumination propre, suscitée dans leur sein par l'ébranlement primitif ; de milieux qui, suivant l'expression de M. Arago, engendrent une lumière propre sous l'influence du rayon qui les éclaira d'abord : que pour analyser un son on emploie comme réactif une paroi qui va vibrer elle-même et donner naissance à un son propre, c'est vraiment inconcevable, et l'on nous pardonnera d'avoir tant insisté sur la réfutation du travail d'ailleurs curieux de M. Brewster, parce qu'il ouvrait une voie funeste.

L'illustre physicien nous pardonnera de l'avoir franchement combattu. Nous ne pouvions nous taire quand nous avions la conviction intime qu'il avait imprimé à la science un mouvement rétrograde. La couleur était réellement bien définie par la sensation produite, quand cette sensation était particularisée, caractérisée par la réfrangibilité ou la longueur d'ondulation ; il y avait là le *genre* et la *différence prochaine* que réclame toute bonne définition ; il y avait un fondement solide à l'analyse de la lumière transmise par les divers milieux ; il y avait de quoi spécifier, non pas la nature intime, mais le résultat de l'absorption produite par ces mêmes milieux. Dans les idées de M. Brewster, où rien n'est et ne peut plus être défini, où tout est confondu, il n'y a qu'incertitude et ténèbres. Le progrès ici donc, comme souvent ailleurs, sera dans le retour, et nous nous en tiendrons jusqu'à nouvel ordre aux idées admises sur la constitution du spectre solaire. Bien avant M. Brewster, Mayer regarda toutes les couleurs comme provenant de trois couleurs primitives, le rouge, le jaune et le bleu ; Young voulut que les trois couleurs fondamentales fussent le rouge, le vert et le violet. Chacune de ces hypothèses rendait facilement compte de toutes les nuances possibles, et les représentait numériquement, pourvu qu'on n'eût égard qu'à la sensation prédominante. Mais ce ne sont pas là, pas plus que chez M. Brewster, des théories vraiment physiques.

M. Mathiessen d'Altona a présenté à l'Académie des sciences, le 8 juillet 1844, des dessins du spectre solaire vu par son lentiprisme perfectionné, lequel s'étend au-delà du rouge extrême de Fraunhofer

et y ajoute une étendue violette égale aux trois quarts de tout le spectre optique préalablement connu. Cette nouvelle partie violette du spectre est couverte d'un grand nombre de raies obscures, remarquables pour la plupart par leur disposition régulière en groupes. Il est fâcheux que cette annonce de M. Mathiessen n'ait pas reçu la sanction de la science. Ce fait était assez extraordinaire pour que les commissaires nommés par l'Académie, MM. Arago, Mathieu, Babinet, dûssent s'expliquer immédiatement sur son existence; surtout puisque M. Mathiessen avait déposé sur le bureau du président les appareils nécessaires à la vérification des expériences. Ce qu'il y a au moins de remarquable, c'est que le fait énoncé est pleinement d'accord avec la théorie : si l'on devait découvrir une nouvelle couleur vers l'extrémité rouge du spectre, cette couleur devait être violette, tandis que la couleur que l'on pourra mettre un jour en évidence à l'extrémité violette devra nécessairement être rouge. Euler a depuis longtemps prévu ces faits.

Terminons cet examen du spectre solaire en rappelant que, suivant Fraunhofer, les intensités lumineuses des diverses parties du spectre sont représentées par les nombres suivants : rouge extérieur, 32; milieu du rouge, 94; orangé, 640; entre le jaune et l'orangé, 1000; vert, 480; bleu, 170; entre le bleu et le violet, 31; milieu du violet, 5. La figure ci-jointe représente assez bien ces variations d'intensité; le maximum M se trouve à la séparation O de l'orangé et du jaune.



DES COULEURS EN ELLES-MÊMES.

Arrivons maintenant à une question plus grave encore : Que sont en elles-mêmes les couleurs?

Les anciens philosophes ont mis les couleurs au nombre des corps dont nous ne connaissons que les noms. Quand on leur demandait pourquoi tel corps était rouge, ils répondaient que c'était par une qualité qui le faisait paraître rouge.

Dans le système de l'émission, où les rayons sont supposés sortir des corps lumineux en forme d'effluve dardé en tous sens, on veut que les particules lancées diffèrent en grosseur ou en masse, de même qu'un robinet pourrait donner du vin, de l'huile et d'autres liqueurs; de sorte que les différentes couleurs soient causées par diverses matières subtiles lancées des corps lumineux. La couleur rouge serait donc une certaine matière subtile lancée d'un corps lumineux; la couleur jaune et les autres couleurs seraient une autre matière subtile, etc., etc. Si le système de l'émission était soutenable, cette hypothèse rendrait compte assez naturellement des diverses couleurs.

Descartes, qui le premier eut le courage d'approfondir les mystères de la nature, attribua les couleurs à un certain mélange de lumière et d'ombre. Mais comment l'ombre, qui est une absence de lumière, pourrait-elle produire les différentes couleurs ?

De fait, comme nous ne voyons que par les rayons qui entrent dans nos yeux, il faut que les rayons qui excitent la sensation de la couleur rouge soient d'une autre nature que ceux qui nous donnent la sensation des autres couleurs; et par conséquent, chaque couleur doit dépendre d'une certaine qualité de rayons qui vient frapper l'organe de la vue. Un corps nous paraît rouge, lorsque les rayons qu'il envoie à nos yeux sont de nature à exciter la sensation du rouge, etc.

La question des couleurs se résout donc dans cette autre question : En quoi consiste la différence qui existe entre les divers rayons lumineux, et qui fait que les uns excitent la sensation du rouge et les autres la sensation des autres couleurs ?

Des couleurs simples.

Nous désignons sous le nom de couleurs simples les couleurs qui résultent d'un seul et même mouvement lumineux; les couleurs composées sont pour nous celles qui ont leur cause dans la

coexistence, la superposition, la mutuelle influence de divers mouvements lumineux. Dans l'hypothèse de l'émission, les couleurs simples correspondraient à l'impression produite par une seule espèce de molécules lumineuses, animées toutes de la même vitesse. Les couleurs composées seraient produites par l'action simultanée de molécules différant les unes des autres par leur matière ou la vitesse dont elles sont animées.

Pour jeter dès le début un plus grand jour sur la théorie des couleurs simples ou composées, considérées en elles-mêmes ou dans les corps, nous analyserons avec quelque étendue la belle exposition du système des ondulations que le grand Euler nous a laissée.

» L'éther est un fluide comme l'air, mais infiniment plus subtil et plus délié. Il a une très grande élasticité par laquelle il tend à se répandre dans les espaces qui pourraient être vides, de sorte que si par quelque accident l'éther était chassé de quelque endroit, l'éther voisin s'y précipiterait dans un instant, et cet endroit en serait de nouveau rempli. En vertu de cette élasticité, l'éther ne se trouve pas seulement au-dessus de notre atmosphère, mais il la pénètre partout, s'insinue dans les pores de tous les corps d'ici-bas, et les traverse librement. De même que l'air est propre à recevoir les agitations ou les ébranlements des corps sonores et de les répandre en tous sens, ce qui fait la propagation du son ; l'éther doit pouvoir lui-même recevoir des ébranlements, et les continuer à de très grandes distances. Les ébranlements de l'air produisent le son ; les ébranlements de l'éther donnent naissance à la lumière ou aux rayons lumineux. Il ne vient donc rien de plus du soleil jusqu'à nous que d'une cloche dont le bruit parvient à nos oreilles. Le soleil en éclairant ne perd pas plus de sa substance que la cloche en sonnant.

» Une cloche ne lance pas de particules qui entrent dans les oreilles. On n'a qu'à la toucher, pour s'assurer que toutes ses parties sont agitées d'un frémissement très sensible. Cette agitation se communique de proche en proche aux particules plus éloignées, de sorte que toutes en reçoivent successivement un frémissement semblable, qui, pénétrant dans l'oreille, y excite le sentiment du son. On voit trembler, aller et venir les cordes d'un instrument de musique ; on peut même déterminer par le calcul combien de vi-

brations chacune d'elles exécute par seconde ; ces vibrations sont transmises aux particules de l'air voisines de l'organe de l'ouïe, l'oreille en est frappée autant de fois précisément pendant une seconde. Plus le nombre d'oscillations que la corde achève dans une seconde est grand, plus le son est haut et aigu, tandis que les vibrations moins fréquentes produisent des sons bas et graves. Les mêmes circonstances qui accompagnent la sensation de l'ouïe se trouvent d'une manière tout-à-fait analogue dans celle de la vue.

» Il n'y a que le milieu et la rapidité des vibrations qui soient différents. Quant au son, c'est l'air à travers lequel les vibrations des corps sonores sont transmises ; mais à l'égard de la lumière, c'est l'éther ou ce milieu incomparablement plus subtil et plus élastique que l'air, qui se trouve répandu partout où l'air et les corps de la nature laissent des interstices.

» Si la densité de l'air diminuait, le son serait accéléré ; il le serait encore si l'élasticité de l'air augmentait : donc, puisque l'éther est à la fois moins dense et plus élastique que l'air, on ne doit pas être surpris que la vitesse de la lumière soit si incomparablement plus grande que celle du son.

» Les vibrations qui causent la lumière sont évidemment plus vives et plus rapides que celles qui causent le son, puisque l'éther, incomparablement plus subtil que l'air, est bien plus difficile à mettre en vibrations. 32 vibrations par seconde suffisent pour produire un son dans l'air ; il faut des vibrations beaucoup plus fréquentes, plusieurs milliers ou millions de vibrations peut-être par seconde, avant que l'éther soit ébranlé. Une agitation si rapide ne peut exister que dans les plus petites particules éthérées que les corps renferment, lesquelles par leur imperceptibilité échappent à nos sens. La lumière est donc produite par une agitation extrêmement vive et rapide, qui se trouve dans toutes les particules éthérées des corps lumineux et du soleil, dont chacune doit s'ébranler plusieurs millions de fois dans chaque seconde.

» Toutes les fois donc que cet éther est mis en vibrations, et que ces vibrations sont transmises à l'œil, l'œil reçoit la sensation de la vision, qui n'est alors autre chose qu'un système de vibrations semblables qui agitent les plus petites fibres nerveuses du fond de l'œil.

» On comprend que la sensation doit être différente selon que le mouvement vibratoire est plus ou moins fréquent, ou que le nombre des vibrations qui se font dans une seconde est plus ou moins grand. Il doit en résulter une différence semblable à celle qui se fait dans les sons lorsque les vibrations rendues dans une seconde sont plus ou moins fréquentes. Cette différence est très sensible à notre oreille, puisque le grave et l'aigu des sons en dépendent. Il n'est pas douteux que le sens de la vue ne soit aussi différemment affecté, selon que le nombre des vibrations excitées dans les fibres nerveuses du fond de l'œil est plus ou moins grand. Il est bien vrai que l'organe de notre vue n'est pas en état de compter ces grands nombres, moins encore que notre oreille ne compterait les vibrations qui constituent les sons; mais toujours pouvons-nous fort bien distinguer le plus et le moins, ou les rapports. C'est dans cette différence et dans ces rapports qu'il faut chercher la cause des diverses couleurs, et l'on ne saurait douter que chaque couleur réponde à un certain nombre de vibrations dont les fibrilles de nos yeux sont animées dans une seconde, quoique nous ne soyons pas encore en état de déterminer le nombre qui convient à chaque couleur, comme nous le faisons pour les sons. »

Les diverses couleurs sont donc, suivant Euler, par rapport à la vue, ce que sont les différents sons de la musique pour l'ouïe.

Les divers sons diffèrent entre eux par trois caractères saillants, le ton. l'intensité et le timbre. Le ton consiste dans l'élévation plus ou moins grande du son, qui peut être grave ou aigu.

L'intensité est la force plus ou moins grande du son, qui produit sur l'oreille une sensation plus ou moins forte.

Le timbre enfin est cette qualité particulière qui fait qu'on distingue l'un de l'autre deux sons; le *fa* de la flûte, par exemple, du *fa* du cor, quoique ces deux sons aient le même ton ou vibrent à l'unisson d'un même diapason. Cette sensation du timbre peut, sous quelque rapport, être comparée au phénomène que l'on remarque dans la voix humaine : quand en chantant on prononce *a*, le son est tout autre que si l'on prononçait l'une des lettres *e*, *i*, *o*, *u*, et il est bien évident qu'il ne faut pas chercher la différence dans le *ton* du son, qui est resté le même. »

L'*intensité* d'un son dépend également et du nombre des parti-

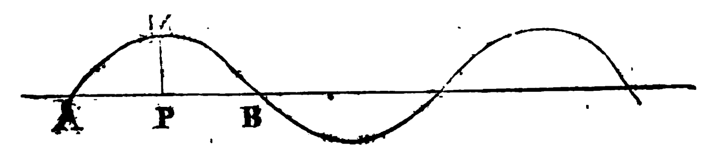
cules sonores qui vibrent simultanément, et de l'amplitude des oscillations de ces particules ou de l'étendue de leurs excursions. L'expérience prouve que le son d'un timbre, par exemple, devient beaucoup plus intense, si on le met en présence d'une masse d'air qui puisse vibrer à son unisson; ou si on le frappe ou le frotte plus fort; ou si on le fait vibrer dans l'air condensé; ou si, sans faire varier la densité de l'air renfermé dans le récipient, on augmente l'élasticité de cet air en élevant sa température. L'intensité du son diminue, au contraire, à mesure que le vide du récipient dans lequel on a placé le timbre devient plus parfait : alors, en effet, l'air du récipient, devenu plus rare et moins élastique, est moins comprimé, et revient avec moins d'énergie à sa position primitive, etc. Tout le monde sait que sur les hautes montagnes, où l'air est plus rare, le son est beaucoup plus faible que dans la plaine.

Le *ton* du son ne peut pas être tantôt grave, tantôt aigu, sans qu'il y ait quelque variation dans le mouvement de l'air qui agit sur l'organe de l'ouïe, et par conséquent aussi dans le mouvement du corps sonore. Cette différence ne consiste pas dans des vibrations plus ou moins fortes : la force des vibrations détermine seulement, en effet, la quantité ou l'intensité du son; elle ne peut donc avoir pour raison que la rapidité plus ou moins grande de ces mêmes vibrations. Cette conclusion s'appuie sur de nombreuses expériences.

Quand une corde vibrante est plus courte, plus tendue, ou d'un plus petit diamètre, elle rend un son plus aigu; elle rend, au contraire, un son plus grave quand elle est plus longue, moins tendue, d'un plus grand diamètre; et il est prouvé par le fait même que la corde plus courte, plus tendue, plus fine, fait un bien plus grand nombre d'oscillations que la corde plus longue, moins tendue, moins fine. Cette différence est sensible, même à la vue. Le son aigu est donc rendu par les cordes dont les oscillations sont plus nombreuses; le son grave, par les cordes qui oscillent plus lentement. On s'assure encore que l'acuité du son augmente dans la même proportion que le nombre des oscillations. L'oscillation plus ou moins fréquente est donc liée intimement avec le ton du son rendu par la corde; et le ton dépend de la rareté ou de la fréquence des oscillations, comme l'effet dépend de la cause. Ce que nous venons de

dire des cordes s'étend aux cloches, aux timbres, aux verres, à tous les corps sonores de ce genre; les corps percutés passent de leur forme circulaire à la forme ovale, et exécutent un certain nombre d'oscillations, se déformant tour à tour et revenant à leur forme première. Le son qui résulte de ce mouvement oscillatoire est d'autant plus aigu que le mouvement est plus rapide. Remarquons d'ailleurs que le nombre des vibrations excitées dans l'air est toujours proportionnel au nombre des oscillations du corps sonore; donc le ton d'un son transmis par l'air est en rapport direct avec le nombre des oscillations des molécules aériennes.

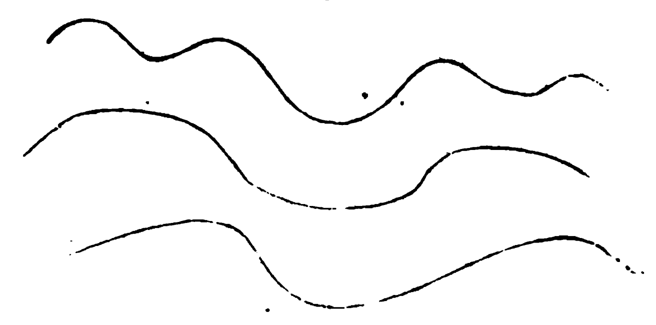
La question du *timbre* est plus délicate et moins bien résolue. Quelques auteurs semblent croire que le timbre peut être considéré comme une qualité inhérente même aux sons simples, en sorte que deux sons simples à l'unisson pourraient se distinguer l'un de l'autre. Il semble, dit Baumgartner, que la qualité ou le timbre d'un son dépend de la loi qui détermine les vitesses successives que prend la molécule vibrante pendant le temps d'une oscillation. Cette loi peut être plus ou moins simple, plus ou moins compliquée, et par suite le son produit peut n'être qu'un bruit, ou, s'il arrive à l'état de son, se revêtir de l'un des caractères que l'on désigne sous tant de noms divers: bourdonnement, mugissement, sifflément, etc. Supposons, pour fixer les idées, qu'un mouvement vibratoire ou ondulatoire de l'air soit représenté par la courbe suivante, dans laquelle les abscisses représentent le temps, et les ordonnées la vitesse des particules vibrantes; AB, ou la demi-longueur d'onde proportionnelle au temps que la molécule met à faire son excursion, déterminera le ton du son; MP, ou l'amplitude maximum, définirait



son intensité; la forme de la courbe enfin, qui constitue la loi des vitesses, fixerait le timbre, dans l'idée de M. Baumgartner.

Les divers sons représentés par les courbes suivantes auraient même longueur d'ondulation, même amplitude maximum, et par

conséquent même ton, même intensité; mais comme les formes des courbures sont essentiellement différentes, les timbres des sons produits seraient par là même essentiellement différents. M. Pouillet dit que le timbre dépend de l'ordre dans lequel se succèdent les vitesses et les changements de densité dans les diffé-



rentes tranches d'air qui sont comprises entre les deux extrémités de l'onde, et qu'il dépend aussi de ce que les portions condensées et raréfiées de l'onde peuvent être dissymétriques dans une foule de circonstances.

Il nous semble beaucoup plus probable que le timbre n'est pas une qualité propre du son simple unique, et qu'il appartient essentiellement au son composé ou multiple. Tous les corps sonores rendent nécessairement en vibrant plusieurs sons distincts; il est comme impossible de faire produire à une corde un seul son; le son résultant de ses oscillations est toujours multiple, et une oreille exercée distingue facilement les divers sons composants. Or, le timbre, dans notre opinion, serait précisément la sensation résultant de l'ensemble des sons composants; le nombre, la nature, l'intensité de ces sons, varient d'un corps à l'autre, et voilà pourquoi il y a tant de timbres différents. Ainsi donc chaque corps qui vibre et chaque particule de ces corps sont animés de divers mouvements vibratoires simultanés. Le plus prononcé de ces mouvements étouffe en quelque sorte les autres, et détermine le ton; les autres influent sur l'intensité et le timbre. Cette manière de voir ne contredit pas absolument l'opinion que nous avons d'abord énoncée; car, quand la forme de la courbe qui représente le mouvement ondulatoire est complexe, le son rendu est en général multiple. M. Seebeck croit, par exemple, que la seconde forme de courbe

ci-dessus correspond à un mouvement qui produirait à la fois le son fondamental et son octave.

Ce que nous venons de dire pour le son doit s'appliquer à la lumière avec des modifications convenables ; de sorte que dans toute couleur nous devons retrouver aussi le ton ou la *teinte*, l'intensité ou l'*éclat*, et de plus quelque chose d'analogue au timbre ou la *nuance*.

On peut comparer les couleurs aux divers sons d'une octave, puisque les couleurs comme les sons se peuvent exprimer en nombres. Newton a conclu de ses expériences que les sept couleurs principales occupent dans le spectre des espaces qui sont entre eux dans la même proportion que les intervalles des sept sons de la gamme.

Terminons ce que nous venons de dire sur les couleurs simples en demandant si une couleur donnée est en elle-même quelque chose d'absolu, qu'on puisse déterminer en soi, ou si elle n'est que relative ; de telle sorte qu'on ne l'apprécie que par comparaison avec une autre couleur adjacente, ou dont le souvenir a conservé la sensation. On doit forcément admettre, il nous semble, que la couleur, comme le son, est quelque chose d'absolu, puisqu'elle est le résultat d'une série d'impressions réelles produites sur l'organe de la vue ; mais que l'appréciation du ton de la couleur est quelque chose de relatif, quoique dans un degré moins déterminé que pour le son. Tous les sons, en effet, quant au ton, s'expriment facilement au moyen d'un son unique, pris pour point de départ, et l'on est loin d'avoir obtenu quelque chose de semblable pour les couleurs.

Des couleurs composées.

Tout le monde sait que l'ensemble de plusieurs sons formant un son composé peut produire, quant au ton, le même effet qu'un son simple. De plus, lorsque deux corps résonnent à la fois, l'oreille à laquelle arrivent, par l'intermédiaire de l'air, les deux sons produits est moins fortement impressionnée quand les deux impulsions qu'elle reçoit arrivent dans des instants différents ; elle l'est plus fortement, au contraire, quand les deux impulsions sont simultanées. Si les deux sons ont le même ton, c'est-à-dire si les deux

nombres de vibrations sont les mêmes, l'oreille ne percevra pas cette inégalité de sensation, soit que les vibrations des deux sons se succèdent ou se suivent : car, dans le premier cas, les pulsations coïncideront toujours; dans le second, elles ne se rencontreront jamais, et l'oreille n'aura la sensation que de l'un des sons. Mais si les nombres de vibrations sont différents, alors même qu'elles n'auraient pas commencé à la fois, elles finiront par se rencontrer; l'oreille sera alors plus vivement affectée, et il en résultera pour elle une série de battements qui se succéderont avec plus ou moins de rapidité, et produiront le même effet que si un troisième corps envoyait à l'oreille ses vibrations. Quand le nombre des battements par seconde sera suffisamment grand, leur ensemble produira la sensation d'un son nouveau distinct des deux sons primitifs; ce son nouveau fera naître à son tour de nouveaux battements, etc., etc., et l'on verra apparaître toute une classe de sons secondaires que l'on a désignés sous le nom de *sons résultants* ou *combinés*. On les nomme aussi *sons subjectifs*, parce qu'ils ne sont pas le résultat direct des vibrations d'un corps sonore, et qu'ils ont leur raison fondamentale dans l'organe même de l'ouïe. Cette dénomination de *son subjectif* est moins exacte depuis que Savart a démontré que les battements ne se produisent pas seulement dans l'oreille, mais qu'ils existent avant tout dans les corps vibrants primitifs, et que de là ils se propagent réellement dans les différents milieux comme les autres sons. En faisant parler deux tuyaux d'orgue, rendant, par exemple, les sons *do* et *ré*, on éprouve à chaque battement de très fortes secousses dans les mains placées sur le sommier ou sur les tuyaux. Il en est de même si l'on touche une contre-basse dont on fait vibrer deux cordes, de manière à obtenir des battements. On remarque en outre que les cordes éprouvent des maxima et des minima dans leurs amplitudes; que le maximum de l'une coïncide avec le minimum de l'autre. Quand les battements sont produits par deux tuyaux à anches, on voit que leurs languettes éprouvent des variations très considérables dans leurs amplitudes. Il est donc probable que les sons résultants ne sont pas exclusivement des sons subjectifs.

Appliquons ce que nous venons de dire à la lumière. S'il existe des sons composés, il doit exister aussi des couleurs composées.

Si la réunion de plusieurs sons peut différer par l'*intensité* seulement et par le *timbre* d'un son simple, ou peut produire quant au *ton*, c'est-à-dire quant à ce qu'il y a de plus essentiel, la même sensation qu'un son simple ; si l'existence simultanée de deux sons peut donner naissance à un son nouveau ou même à une série de sons distincts des sons primitifs, ne doit-on pas admettre aussi que la réunion de plusieurs couleurs peut différer par l'éclat seulement, ou par quelque autre propriété accidentelle d'une couleur simple ; peut produire quant à ce qu'il y a de plus essentiel, le même effet qu'une couleur simple, et que l'existence simultanée de deux couleurs peut donner naissance à une couleur nouvelle, ou même à une série de couleurs distinctes des couleurs primitives? Cette conclusion n'est pas pour nous l'objet d'un doute sérieux. Mais arrêtons-nous à cet aperçu ; attendons, pour entrer dans de plus grands détails, que l'on ait réuni un plus grand nombre de faits.

DES COULEURS CONSIDÉRÉES DANS LES CORPS.

THÉORIES DIVERSES SUR LES COULEURS PERMANENTES DES CORPS.

S'il est très difficile, comme nous l'avons vu, de bien définir les couleurs en elles-mêmes, il est beaucoup plus difficile encore d'expliquer d'une manière pleinement satisfaisante, le phénomène si remarquable de la coloration des divers corps de la nature.

Théorie de Newton.

Exposons d'abord en peu de mots la théorie si hardie et si ingénieuse de Newton, sous les formes principales qu'elle a reçues. Cette théorie repose sur divers *postulata* qu'il faut d'abord énumérer.

1° Tous les corps sont poreux ; les pores ou intervalles vides de la matière pondérable prennent une partie beaucoup plus considérable de l'espace occupé par un corps que les parties solides qui le constituent essentiellement.

2° Les particules solides d'un milieu, et par suite les pores, ont une grandeur et peut-être une figure qui leur est propre, et qui convient uniquement à ce milieu ; cette grandeur ne peut être changée

par une action mécanique ou par aucune autre voie qui n'entraîne pas un changement dans la nature chimique ou dans la constitution intime du milieu ; ces particules sont, en un mot, les derniers atomes. Rompre ces atomes, c'est détruire leur essence et leur donner une autre forme matérielle possédant d'autres propriétés.

3° Ces atomes sont parfaitement diaphanes et également perméables à la lumière de tous les degrés de réfrangibilité, qui, dès qu'elle a une fois pénétré leur surface, poursuit sa route au travers de leur substance.

4° L'opacité des corps provient de la multitude des réflexions qui ont lieu dans leur intérieur.

5° Les couleurs des corps sont celles des lames minces ; elles sont dues à la même cause, c'est-à-dire à l'intervalle entre les surfaces antérieures et postérieures des atomes. Lorsque cet intervalle est un multiple impair de la moitié de la longueur de l'accès, d'un rayon coloré quelconque qui se meut dans ce milieu, ce rayon ne peut pas pénétrer. Le contraire a lieu si cet intervalle est un multiple pair ; c'est donc l'épaisseur des atomes et leurs distances réciproques qui déterminent la couleur qu'un milieu réfléchit ou transmet sous l'incidence perpendiculaire. Ainsi, si les molécules ou interstices ont une grandeur au-dessous de l'intervalle qui correspond à la transmission, c'est-à-dire au bord de la tache noire dans les anneaux réfléchis, le milieu composé de ces atomes et de ces pores sera parfaitement diaphane. Si la grandeur dont il s'agit surpasse cet intervalle, le milieu réfléchira une couleur correspondant à l'excès d'épaisseur.

Développements donnés à cette théorie par M. Biot.

« Aucun corps n'est un assemblage continu de matière, mais tous sont composés de particules matérielles placées à distance, et maintenues dans cet état par les forces opposées de l'attraction et de la chaleur ; il est probable même que dans les corps qui nous paraissent les plus denses, la capacité des interstices surpasse plusieurs milliers de fois le volume des particules matérielles. Ce mode de constitution des corps est d'ailleurs, évidemment, le plus général que l'on puisse concevoir. Pour expliquer maintenant comment de pareils systèmes peuvent avoir des couleurs propres, qui demeurent

les mêmes sous tous les aspects, il suffit d'admettre que les groupes de particules les plus composées y sont fort petits, et que, soit par leur densité, soit par leur nature, ils réfractent la lumière beaucoup plus fortement que le milieu ou les milieux quelconques qui sont interposés entre eux. La première condition est autorisée par l'impossibilité où nous sommes de distinguer avec les meilleurs microscopes ces groupes élémentaires; la seconde est nécessaire pour que leurs couleurs soient permanentes sous toutes les inclinaisons.

» Lorsqu'un faisceau lumineux pénètre dans un pareil système, on doit d'abord concevoir qu'un certain nombre de rayons peuvent passer parmi tous les groupes sans les traverser, et de là ressortir de nouveau dans l'espace. Ce sera la portion de lumière que ce corps peut transmettre sans altération. On doit aussi concevoir qu'un certain nombre de rayons rencontrent les groupes mêmes qui forment la substance des corps, et sont contraints de les traverser. Dans ce cas, à leur incidence sur la première surface de chaque groupe, ils y éprouveront d'abord une réflexion partielle; mais l'effet en pourra être très faible et presque insensible, si le groupe est fort mince, comme nous l'avons supposé. Lorsque les molécules qui ont pénétré le groupe arriveront à la seconde surface, il y en aura parmi elles qui se trouveront disposées à être réfléchies et d'autres à être transmises. Celles qui subiront réellement la réflexion formeront la couleur propre du groupe; elle sera la même sous toutes les incidences, si le pouvoir réfringent du groupe est très énergique, ce qui n'empêche pas que celui du corps entier ne puisse être très faible, et si le groupe ne peut être traversé que par son centre de gravité. La portion de lumière qui a traversé un premier groupe, en échappant à la réflexion de sa seconde surface, continuera de se transmettre jusqu'à ce qu'elle en rencontre un autre qui produise sur elle des effets pareils, c'est-à-dire qui réfléchisse une partie du reste; et ainsi de suite, de groupe en groupe jusqu'à ce que l'ensemble des rayons qui, dans la lumière incidente, étaient propres à composer la couleur propre du corps, soit complétement épuisé. La somme de ces réflexions composera donc la couleur totale du corps entier, laquelle ira ainsi en croissant d'intensité avec

l'épaisseur, tant que les groupes qui reçoivent les derniers la lumière auront quelque chose à réfléchir.

» Considérons maintenant la portion de lumière qui, échappée à toutes les forces réfléchissantes des groupes successifs, se transmet à travers l'épaisseur entière du corps. Si elle contenait tous les rayons non réfléchis par les groupes, elle serait complémentaire de leur couleur; sa teinte serait seulement affaiblie par la portion de lumière blanche qui peut traverser le corps en serpentant parmi les groupes sans se décomposer. Mais cette opposition exacte ne s'observe jamais rigoureusement dans aucun corps; il y a toujours une certaine portion de lumière colorée qui ne se trouve ni dans la couleur réfléchie ni dans la couleur transmise, et qui en conséquence est absorbée par le corps, ou éteinte dans sa substance. Par exemple, l'or réduit en feuilles très minces est jaune lorsqu'on le voit par réflexion, et vert lorsqu'on le regarde par transmission; pourtant, dans les anneaux réfléchis, il n'y a point de jaune qui ait pour complément du vert. La couleur transmise devrait être bleue; mais si de ce bleu on ôtait un certain nombre de rayons violets et bleus que l'or absorberait dans sa substance, il resterait du vert. Ici le progrès de l'absorption est très rapide, à cause de la grande densité de la substance; dans d'autres cas elle est plus lente et ordinairement graduelle. Alors, en faisant varier l'épaisseur du corps par une progression insensible, on voit la lumière transmise changer successivement de teinte, perdant d'abord une certaine espèce de rayons, puis une seconde, une troisième, jusqu'à ce qu'enfin son intensité devenant trop faible pour être aperçue, le corps paraît tout-à-fait opaque. L'ordre suivant lequel cette déperdition successive s'opère est déterminé pour chaque substance, mais il varie dans les substances diverses. Par exemple, si l'on verse dans un verre conique une dissolution de certains bois colorés, et qu'en l'exposant à la lumière des nuées on la regarde par réflexion, elle paraîtra bleue; mais si on la regarde par transmission, elle paraîtra jaune dans le bas du verre, orangée un peu plus haut, et enfin rouge dans les parties où l'épaisseur traversée par les rayons est plus grande. Dans ce cas, les rayons violets et bleus sont très abondamment réfléchis par la liqueur, puis-

que les plus petites gouttes de la liqueur paraissent de cette teinte : ces rayons pénétreront donc à peine le liquide ; mais les rayons verts y entreront plus facilement, et encore plus les jaunes, les orangés, les rouges, toutes lesquelles couleurs prises ensemble composeront le jaune pâle que l'on observe par transmission dans le fond du verre, où l'épaisseur est plus petite. Un peu plus haut, c'est-à-dire à travers une épaisseur plus forte, les rayons verts seront aussi absorbés, et le reste composera un orangé. Enfin à une épaisseur plus grande encore, les jaunes seront absorbés à leur tour, puis les orangés, et enfin les rouges si l'épaisseur est suffisante ; d'où résulterait successivement l'orangé transmis, et ensuite un rouge graduellement de plus en plus sombre jusqu'à ce qu'il se transforme en opacité.

» On voit par cette théorie qu'il peut exister des corps qui paraissent de même couleur par transmission et par réflexion ; car il suffit pour cela que l'espèce de lumière qu'ils réfléchissent en plus grande abondance soit aussi celle qui les traverse plus aisément ; et il paraît qu'un grand nombre de liqueurs rouges offrent cette particularité ; on l'observe aussi dans certains verres rouges. Il résulte encore de ces principes que si l'on fait successivement passer le même faisceau lumineux à travers deux liquides, dont le second réfléchit la portion que le premier a transmise ; on doit obtenir une complète opacité ; et c'est ce que Hook a observé le premier avec surprise, ayant placé l'un derrière l'autre deux prismes égaux et opposés, dont l'un était rempli d'une liqueur rouge, et l'autre d'une liqueur bleue, toutes deux d'une teinte très chargée.

» N'est-ce pas une grande induction, ajoute M. Biot, en faveur de cette théorie, que de voir tous les effets des particules insensibles dont les corps se composent exactement assimilées à ceux que nous observons dans les lames minces, sur une échelle assez grande pour pouvoir en mesurer tous les détails ? Ce qui semble la confirmer encore, c'est que pour tous les corps solides ou liquides que l'on a pu réduire à de telles lames minces, l'ordre et la succession des couleurs se sont toujours retrouvées pareilles, indépendamment de l'affinité. Il y a toujours sept ordres d'anneaux sensiblement distincts ; après quoi le mélange se confond avec une blancheur uniforme. Le passage des premières teintes aux dernières se fait tou-

jours par les mêmes gradations d'épaisseur, quelle que soit la nature chimique des substances réfléchissantes, que ce soit de l'eau, ou de l'huile, ou du métal ou du verre. Les couleurs produites dans tous les cas sont si exactement les mêmes, que personne ne saurait les distinguer. Quelles analogies pour penser que les mêmes lois s'étendent aussi à la réflexion opérée dans les groupes matériels qui composent les corps !

» Ce qui est non moins étonnant encore, c'est que lorsqu'un corps change graduellement de couleur, par l'effet d'une action chimique quelconque, assez lente pour qu'on en puisse observer les diverses périodes, les teintes par lesquelles il passe suivent toujours exactement l'ordre assigné par la table de Newton. Cette loi s'observe dans presque tous les degrés de la végétation. Newton a remarqué que le vert vif des plantes appartient au troisième ordre ; si ce vert vient à passer au rouge, il descendra nécessairement dans l'ordre des anneaux ; et par conséquent, suivant la théorie de Newton, cela ne pourra se faire sans que la couleur de la feuille passe successivement par le jaune, l'orangé, et l'orangé rougeâtre : or, c'est précisément ce qui arrive aux feuilles des plantes lorsqu'elles se flétrissent, comme Newton l'a bien observé.

» En examinant les variations des teintes d'un grand nombre de feuilles et de fleurs dans les diverses périodes de leur végétation, il semble, que tant que la force végétative se développe, les couleurs montent dans l'ordre des anneaux, et qu'au contraire quand cette force s'affaiblit, elles descendent. Ainsi les jeunes pousses du chêne et du peuplier sont d'abord d'un rouge tirant sur l'orangé ; de là elles passent à un orangé rougeâtre, et bientôt au vert, en passant par une sorte de jaune rougeâtre extrêmement fugitif : or, c'est aussi là précisément le progrès des nuances que l'on observe dans les anneaux, quand on remonte du rouge au vert du troisième ordre. Quand la fleur du chèvrefeuille s'épanouit, sa couleur est un blanc pur du premier ordre ; à mesure qu'elle se fane, elle passe au jaune pâle, au jaune, à l'orangé et à l'orangé foncé. Telle est, en effet, la marche des teintes en descendant le premier ordre de la table de Newton. La fleur du *geranium sanguineum*, dont la couleur est un rouge violacé, intermédiaire entre le premier et le second ordre, devient bleue en se fanant après qu'on l'a coupée. Des œillets d'un



rouge si vif qu'on avait peine à en soutenir la vue, et qui était par conséquent du second ordre, sont descendus au rouge-ponceau et au pourpre violacé. La *tigridia*, cette belle fleur qui se développe et se flétrit en quelques heures, paraît, lorsqu'elle n'est pas très ouverte, d'un orangé rougeâtre très vif; de là elle descend au rouge mordoré du premier ordre, et enfin, en se flétrissant, elle passe au rouge violacé du second, toujours en suivant la marche des anneaux.

» Les mêmes périodes s'observent dans les combinaisons chimiques lorsqu'elles s'opèrent avec assez de lenteur pour qu'on puisse saisir les nuances successives de leur coloration. La teinture de tournesol, lorsqu'elle a été longtemps enfermée dans un flacon bouché, devient souvent orangée; ouvrez le flacon, et agitez la liqueur pour la combiner avec l'oxigène de l'air; en peu d'instants elle passe au rouge, puis au bleu violacé, c'est-à-dire du premier ordre au second. Quand la combinaison solide d'oxide de manganèse et de potasse se dissout lentement dans une petite quantité d'eau, elle change successivement de couleur en passant du vert au vert bleuâtre, au bleu, au pourpre, et à un pourpre rouge, c'est-à-dire que sa teinte monte dans l'ordre des anneaux, comme si les particules devenaient plus minces.

» En mêlant, comme l'indique M. Gautier de Claubry, de l'huile d'amandes douces avec de l'amidon et de l'acide sulfurique, on obtient une combinaison d'abord jaune, qui bientôt passe au jaune orangé, à l'orangé foncé, et de là au rouge et au violet; ce qui est précisément la série des couleurs des anneaux, en allant du premier ordre au second. Dans le passage de l'orangé au rouge, il arrive un moment où l'absorption des rayons incidents devient si forte, que le mélange paraît presque noir. M. Biot remarque, à cette occasion, « qu'il faut toujours soigneusement distinguer les périodes de l'intensité avec la marche des teintes; car ces deux classes de phénomènes sont absolument indépendantes l'une de l'autre et suivent des lois toutes différentes; au point que quelquefois, comme nous venons de le voir, la série des teintes est brusquement interrompue par une absorption totale de lumière, qui rend l'intensité nulle et fait passer sensiblement la couleur au noir.

» Les mêmes périodes de coloration s'observent encore dans

toutes les substances réduites par la précipitation en poudres très fines, ou en lames très minces, dont l'épaisseur varie lentement, soit par l'addition de nouvelles couches de même nature, soit plus simplement encore par une expansion momentanée : c'est ce qui arrive, par exemple, pour les oxides métalliques, qui changent momentanément de couleur lorsqu'on les chauffe, et qui reprennent leur teinte primitive par le refroidissement : ces changements ont toujours lieu dans l'ordre des anneaux. On observe le phénomène inverse quand on volatilise de l'indigo pur, étendu sur du papier; car, en se vaporisant, il passe à un rouge-ponceau très vif; ce qui indique que les groupes matériels qui le composent s'amincissent, et peut-être se subdivisent dans l'acte de la vaporisation. L'hématine, lorsqu'elle est pure et solide, a une teinte grisâtre dont il est difficile d'assigner la place, à cause de l'aspect des petites particules qui la composent, et qui peut-être répandent sur elle cette couleur grise par la quantité de lumière blanche qu'elles renvoient directement par une première réflexion. Dissoute dans l'eau à laquelle on a ajouté quelques atomes d'acide acétique, l'hématine produit une liqueur dont la teinte est un jaune du second ordre légèrement verdâtre. Si l'on introduit cette liqueur sous un tube rempli de mercure, et qu'on le chauffe par dehors, elle devient successivement jaune, orangé brillant, rouge brillant, rouge ponceau, pourpre, enfin pourpre très chargé de bleu; et, ce qui est bien remarquable, si on la laisse ensuite se refroidir, elle revient peu à peu à la première teinte; mais il lui faut pour cela un certain temps, par exemple quelques jours, si l'on fait l'expérience sur un volume d'environ un demi-centilitre. Quand on a formé à chaud une dissolution saturée de chlorate de potasse, et qu'on la laisse refroidir avec lenteur; à mesure que la température baisse, le sel se précipite en paillettes rectangulaires très minces qui s'apposent et s'unissent les uns aux autres. Or, leur minceur est d'abord telle qu'elles paraissent colorées, et colorées diversement, selon l'incidence où on les regarde et l'épaisseur où elles sont parvenues. Les plus épaisses sont déjà d'un blanc uniforme; les plus minces, en s'unissant les unes aux autres, deviennent blanches à leur tour; quelquefois elles ne s'appliquent pas exactement les unes sur les autres, alors elles ne cessent pas de réfléchir leur propre teinte, même

quand elles font partie d'une lame beaucoup trop épaisse pour donner des couleurs. Leurs couleurs varient avec l'incidence, mais toujours selon l'ordre des anneaux.

» Si l'on fait attention que, dans tous les cas que nous avons rapportés, les teintes par lesquelles les substances passent ne sont jamais simples, mais composées, et composées comme celles des anneaux; qu'elles varient précisément par les mêmes gradations et les mêmes périodes, on reconnaîtra qu'il y a une analogie extrêmement forte, si ce n'est une identité évidente, entre les couleurs propres des corps et celles que les lames minces réfléchissent à leur seconde surface; on concevra que la seule différence de grosseur et de force réfringente par lesquelles les molécules passent dans leurs dilatations, leurs condensations ou leurs combinaisons diverses, suffit pour produire tous les changements.

» Cette analogie se manifeste également par d'autres caractères dans tous les cas où on peut l'éprouver. Nous avons reconnu que les couleurs des lames minces ne dépendent que de la nature et de l'épaisseur de la plaque, mais nullement du milieu qui l'environne, lequel influe seulement sur l'intensité de la teinte réfléchie. Si donc les couleurs permanentes des corps dépendent de la même cause que celle des plaques minces, l'espèce de leur teinte ne doit pas changer quand on les environnera d'un milieu quelconque, qui n'aura pas assez d'action sur elle pour les décomposer et changer leurs dimensions. Cela s'observe, en effet, lorsque les soies, les draps, ou d'autres substances sont imbibées d'eau ou d'huile. Leurs couleurs deviennent seulement plus sombres, mais ne changent pas de nature, et elles reprennent leur vivacité lorsqu'on a fait évaporer par la chaleur le fluide interposé. La même chose arrive à l'indigo ou au carmin dissous dans l'eau. Quelque étendue que soit la dissolution, la nature de la couleur ne varie pas, son intensité seule est différente; parce que l'eau, en écartant les groupes matériels sans désunir leurs parties constituantes, diminue la quantité de lumière colorée réfléchie dans une épaisseur assignée.

» L'idée de ramener les couleurs permanentes des corps au principe des couleurs des lames minces, en les faisant dépendre de la grosseur et de la force réfringente des groupes matériels qui les composent, est donc tout-à-fait conforme aux analogies, conclut



M. Biot; et quand on vient à considérer que cette théorie explique parfaitement toutes les apparences de coloration que les corps présentent, sans avoir besoin de supposer une seule propriété nouvelle de la matière, on ne peut guère douter qu'elle ne soit vraie. En l'adoptant, on est conduit à voir que les couleurs des corps opaques sont toutes composées, puisque la quantité de lumière renvoyée par le corps est réellement le produit des deux réflexions intérieure et extérieure. Sans cela on ne concevrait pas comment les corps, quels qu'ils soient, paraissent toujours entièrement de la couleur des rayons dans lesquels on les plonge, alors même que ces rayons ne contiennent aucune des couleurs que le corps réfléchit. S'il est encore visible alors, c'est, dit M. Biot, en vertu de la réflexion intérieure qui s'exerce indifféremment sur tous les rayons à sa première surface. Ce qu'il y a de certain au moins, c'est que la couleur de chaque corps est la plus brillante lorsqu'on l'expose à l'espèce de rayons simples qui dominent dans sa couleur, qu'elle est la plus faible quand ces rayons lui sont plus étrangers.

» En admettant comme véritable la théorie précédente, on peut déterminer la grosseur des particules colorées des corps, quand on connaît l'espèce de teinte qu'ils réfléchissent et le rapport de réfraction pour les rayons qui y pénètrent; le calcul est exactement le même que pour déterminer l'épaisseur des lames minces. La difficulté est de savoir à quel ordre on doit rapporter une couleur observée.

» Pour la production du noir, les corpuscules doivent être plus petits qu'aucun de ceux qui produisent d'autres couleurs, car toutes les molécules plus grosses réfléchissent trop la lumière pour former le noir. On peut comprendre par là pourquoi de petites quantités le corps noirs communiquent leur couleur aisément et jusqu'à un fort grand degré à d'autres corps auxquels on les applique, les petites parcelles de ces corps noirs se répandant sans peine, à cause de leur grand nombre, sur les particules grossières des autres corps; pourquoi les corps noirs sont plus tôt échauffés, ce qui peut venir en partie du grand nombre de réfractions faites dans un petit espace, et en partie de l'ébranlement qui est facilement excité dans de si petites parties; et pourquoi les corps noirs tirent ordinairement un

peu sur le bleuâtre, de quoi l'on peut s'assurer en faisant tomber sur du papier blanc une lumière réfléchie par des corps noirs; car, pour l'ordinaire, le papier paraîtra d'un blanc bleuâtre; et la raison, c'est que le noir confine au bleu-obscur du premier ordre, et réfléchit par conséquent plus de rayons de cette couleur que d'aucune autre.

» On sait, depuis les expériences de M. Thénard, que le même morceau solide de phosphore peut être rendu, à volonté, successivement jaune ou noir, transparent ou opaque. Cette observation montre de la manière la plus palpable que la transparence ou l'opacité, la coloration ou la privation de toute couleur, ne sont que des modifications résultantes de l'arrangement et des dimensions des groupes matériels dont les corps se composent. »

Voilà donc la théorie des couleurs de Newton exposée par M. Biot; nous ne nous étendrons pas à la réfuter en détail, nous ne relèverons même pas certaines particularités inadmissibles, et même des contradictions évidentes, par exemple : 1° ces groupes qui ne pourraient être traversés que par leur centre de gravité; 2° ces rayons qui passent plus facilement à travers les pores qui séparent les groupes que par les groupes eux-mêmes, quoique, dans les idées de Newton, les *groupes soient parfaitement diaphanes*, *et également perméables à la lumière de tous les degrés* de réfrangibilité, quoique le pouvoir réfringent des groupes soit beaucoup plus énergique que celui du milieu ou des milieux qui les séparent; 3° ces condensations et ces dilatations des groupes inconciliables avec le postulatum de Newton : *les particules solides d'un milieu ont une grandeur... propre... qui leur convient uniquement... Cette grandeur ne peut-être changée par une action mécanique*, *ou par aucune autre voie qui n'entraîne pas un changement dans la nature chimique du milieu;* 4° le rapprochement des couleurs des corps avec celles des lamelles de chlorate ou de tartrate de potasse, quoique ces dernières couleurs varient très rapidement avec l'incidence, et ne soient nullement la couleur propre de ces deux sels; quoique ces couleurs soient même la négation de la couleur propre et changent d'une lamelle à l'autre. Cette dernière réflexion enlève à elle seule toute probabilité à l'hypothèse développée par M. Biot : les couleurs permanentes des corps sont essentielles, invariables avec

l'incidence ; les couleurs des lames minces sont accidentelles, variables avec l'incidence ; donc ces deux sortes de couleurs ne peuvent sans paralogisme être confondues.

M. Brewster a attaqué directement cette prétendue théorie dans sa base, et l'a renversée sans peine. Sa réfutation consiste à prouver que les couleurs des corps ne peuvent en aucune manière être classées dans les ordres de couleurs de Newton, et que par conséquent elles n'ont aucune relation avec les couleurs des lames minces. La couleur analysée avec le plus de détails par M. Brewster est le vert des végétaux. Son choix était basé sur les motifs suivants : la couleur verte des plantes est la plus répandue dans la nature ; c'est la couleur dont Newton a le plus distinctement décrit la nature et la composition ; enfin sa composition est presque identiquement la même dans toutes les variétés de plantes où elle se montre. De l'examen approfondi de cette couleur, de la détermination exacte de sa composition, M. Brewster conclut que, soit qu'on l'examine dans son premier developpement, ou lorsque sa teinte commence à se faner, elle n'a aucune relation avec les couleurs des lames minces.

L'auteur a soumis au même mode d'analyse environ 150 milieux colorés, consistant en fluides extraits des pétales des feuilles, des semences et des écorces d'arbre, de différentes substances employées dans la teinture, de minéraux, de sels artificiels et de différents gaz colorés. Dans tous ces cas, il obtint des résultats qui prouvent que leurs couleurs ne sont pas celles des lames minces.

Des expériences décrites dans son mémoire, M. Brewster conclut que la seconde proposition de la théorie de Newton est incompatible avec les phénomènes observés ; qu'il n'est pas sûr que les parties transparentes des corps, selon leurs différentes grosseurs, réfléchissent les rayons d'une couleur et transmettent ceux d'une autre, d'après le même mode que leurs lames minces ou aspérités réfléchissent et transmettent ces rayons.

M. Brewster déduit encore de ses expériences l'inexactitude de la première proposition, en établissant qu'il a trouvé des milieux rouges, jaunes, verts et bleus, qui sont absolument incapables de réfléchir ou de transmettre certains rayons définis de la même couleur jaune.

D'une longue étude sur les couleurs des corps qu'il a développée dans trois mémoires insérés dans les *Annales de chimie*, M. Hassenfratz a conclu que s'il est vrai que quelques couleurs permanentes, celles des corps transparents qui réfractent et réfléchissent deux couleurs complémentaires, peuvent être expliquées par la théorie des lames minces, toutes les autres couleurs permanentes, soit que les corps en produisent une seule, soit qu'ils en produisent plusieurs, exigent pour leur explication le double effet de la propriété réfléchissante des atomes et de l'affinité des particules ; la seule considération des molécules considérées comme lames minces serait insuffisante. Du reste, M. Hassenfratz reproche aux partisans de la théorie de Newton d'avoir méconnu que l'immortel physicien avait nettement distingué deux sortes d'effets à l'aide desquels il a expliqué toutes les couleurs, savoir, la propriété des molécules lumineuses, que M. Biot met seules en jeu, et l'affinité des particules pour la lumière. La théorie de Newton, en tant qu'elle se compose de ces deux effets, expliquerait parfaitement, et complétement, suivant M. Hassenfratz, toutes les espèces de colorations observées jusqu'à présent. Cette expression, *affinité des particules des corps pour la lumière*, est bien vague ; on peut lui faire dire ce que l'on veut; il se pourrait donc qu'elle renfermât la vraie théorie des couleurs.

Un observateur très intelligent, M. le comte de Maistre, a émis sur la théorie que nous réfutons le jugement suivant :

« Il est impossible d'expliquer par la théorie des lames minces, ou de la grosseur des particules, les différents phénomènes de coloration. On sait que dans les étoffes teintes et dans les fleurs, les couleurs transmises sont les mêmes que celles qui sont réfléchies. Ce fait incontestable est directement contraire à celui qui résulterait des lames minces, qui transmettent toujours les couleurs complémentaires de celles qui sont réfléchies. Suivant cette théorie, un pétale rouge serait vert par transmission ; une étoffe jaune transmettrait une couleur bleue. Cette identité de couleurs réfléchies et transmises n'est pas un phénomène isolé, une anomalie ; il est général, il comprend les pétales des fleurs de toute espèce, les feuilles vertes des végétaux, les étoffes teintes de toutes couleurs, toutes les matières colorantes employées dans les

peintures, les liqueurs enfin, et les verres colorés. On s'assure encore qu'un pétale coloré quelconque, serré entre deux glaces, perd la couleur de réflexion, tandis que la couleur transmise garde toute sa beauté. Il faudrait donc admettre des particules minces qui ne réfléchissent aucune couleur, et qui en transmettent une très vive ; phénomène qui n'existe pas dans les anneaux colorés.

» Quelques physiciens, pressés par ces difficultés, ont supposé que les corps colorés transparents étaient composés de particules opaques colorées d'une extrême ténuité, placées à des intervalles assez grands pour transmettre une partie de la lumière blanche et conserver la transparence. Ces particules opaques réfléchiraient de l'une à l'autre la couleur par leurs facettes inclinées, et la transmettraient ainsi mêlées à la lumière blanche directe. Mais on n'explique pas dans ce système pourquoi ces particules transmettent la couleur et ne la réfléchissent pas ; on n'explique pas mieux comment des particules opaques peuvent être colorées. Tous les corps colorés, les métaux exceptés, né réfléchissent que la lumière blanche à leur première surface ; la difficulté est donc reculée, au lieu d'être résolue.

» Dans le système des lames, on attribue la blancheur des métaux à la grosseur des particules qui forment le blanc du premier ordre des anneaux. On peut observer à ce sujet que des substances transparentes, comme la nacre et certains micas, ont exactement l'éclat métallique, et réfléchissent autant de lumière que l'argent par la simple superposition de leurs lames, qui, prises à part, n'ont qu'une réflexion très inférieure. Ici le nombre des réflexions partielles produit le même effet que la densité des métaux. L'éclat métallique n'est donc autre chose qu'une réflexion très vive produite par une densité supérieure à celle de tous les autres corps.

» La théorie de Newton n'a donc pour elle que l'étonnante analogie qui existe entre les changements spontanés des couleurs, et l'ordre constant qu'on observe dans les anneaux colorés. Mais la modification de la force absorbante ne pourrait-elle pas produire des résultats semblables ? On peut proposer à ce sujet quelques conjectures qui ne paraissent pas sans probabilité. Tout le monde connaît l'expérience si souvent citée des liqueurs jaunes, placées dans un vase conique qui transmettent à diverses épaisseurs

des couleurs dans l'ordre des anneaux. Le même effet a lieu lorsqu'on remplace la liqueur jaune par une dissolution de matière végétale torréfiée, comme le café. On observe dans la partie la plus mince du cône que la couleur transmise est jaune ; puis, en remontant à de plus grandes épaisseurs, la couleur passe à l'orangé et au rouge. Ce fait paraît une preuve que les changements qui ont lieu dans l'intensité de la force absorbante du carbone peuvent produire des couleurs dans l'ordre des anneaux, comme ceux que l'on observe dans les feuilles de certains végétaux, lorsqu'elles se décomposent, qu'elles passent du vert au jaune, à l'orangé et au rouge, à mesure que la force augmente par le développement du carbone.

» Il ne serait donc pas contre toute probabilité que lorsque, par une action chimique quelconque, la propriété que possèdent les colorants d'absorber certains rayons, éprouve des changements successifs, et que cette force absorbante augmente ou diminue, elle puisse intercepter ou transmettre les rayons suivant l'ordre de leur réfrangibilité, comme on l'a vu dans la dissolution du café torréfié ; ce qui expliquerait par l'affinité les changements de couleur qu'on attribue à la grosseur des particules.

» Un fait remarquable vient à l'appui de cette conjecture. Les changements de couleur qu'éprouvent les végétaux, et généralement tous ceux qui sont produits par une cause chimique quelconque, ne dépassent jamais le centre de la série des couleurs du spectre. On voit les couleurs passer du centre aux extrémités, et des extrémités au centre, et le vert est comme une barrière que ces changements peuvent atteindre, mais qu'ils ne dépassent jamais. On ne saurait expliquer ce fait par les changements successifs de grosseur dans les particules des corps ; mais il s'explique tout naturellement par l'absorption successive des rayons. Suivant cette dernière théorie, une couleur ne peut être produite que par l'absorption d'un ou de plusieurs rayons complémentaires : ainsi, lorsque les rayons d'une moitié de spectre ont été successivement transmis, cela n'a pu avoir lieu que par l'absorption successive de l'autre moitié, lesquels ne peuvent plus, par conséquent, reparaître. Ces changements doivent donc, en général, s'arrêter au centre de la série que présente le spectre solaire.

» Ces observations sont loin d'expliquer les changements spontanés dans leurs détails, mais elles suffisent pour faire voir qu'il existe une analogie frappante entre la force de réfraction qui produit les couleurs des anneaux, et la force d'absorption qui est la cause des couleurs permanentes, et pour faire présumer qu'un changement progressif dans cette dernière peut éteindre ou transmettre les rayons homogènes suivant l'ordre de leur réfrangibilité.

» Une observation intéressante de M. Brongniart vient à l'appui de cette idée. Ce savant observe que toutes les couleurs permanentes ont pour base une substance combustible, et qu'en voyant un corps coloré quelconque, on peut affirmer d'avance qu'il contient un métal ou du carbone, ou du soufre: or, l'on sait que les substances combustibles jouissent d'une force de réfraction supérieure à celle de tous les autres corps, comme elles sont aussi les seules qui produisent l'absorption de la lumière dans les corps noircis. Le diamant, qui est éminemment réfringent, et le carbone, qui absorbe la lumière, sont la même substance.

» Il est donc très probable que la propriété qui produit la réfraction dans les corps, et celle qui produit l'absorption, sont de même nature, et qu'on trouvera de nouveaux rapports entre elles lorsqu'on étudiera plus soigneusement les phénomènes de l'absorption. »

On peut conclure de ce qui précède que M. de Maistre rattache le phénomène des couleurs permanentes des corps à l'absorption : c'est aussi l'opinion de M. Brewster. Mais ce mot absorption a besoin d'être clairement défini. Le phénomène qu'il désigne, loin d'être la cause des couleurs, en est plutôt l'expression sous une autre forme ; c'est, de part et d'autre, le même effet d'une même cause, mais envisagé sous différents points de vue.

Nous reviendrons bientôt sur ce sujet, après que nous aurons reproduit la théorie de l'éclat si bien développée par M. Œrsted, après que nous aurons exposé ensuite les vues ingénieuses de Benedict Prevost sur le mode d'émission de la lumière qui nous fait juger de la couleur propre des corps, puis la théorie d'Euler, si simple et que nous croyons si vraie.

Nous retrouverons à chaque pas dans ce qui va suivre des réfutations nouvelles de la théorie qui attribue les couleurs à une vraie réflexion, à une réflexion régulière semblable à celle qui produit les

anneaux colorés. On conçoit à peine qu'elle ait pu trouver tant de partisans; car tout le monde sait que la couleur propre des corps est d'autant moins visible, d'autant moins sensible, que la réflexion régulière à leur surface est plus grande, et que cette couleur propre ne se montre réellement telle qu'elle est en elle-même que lorsque l'on parvient à faire disparaître toute trace de réflexions régulières.

Théorie de l'éclat, par M. Œrsted.

Avant de se prononcer sur la nature intime de la couleur des corps, il faut étudier avec soin ce qui se passe à leur surface lorsque la lumière vient les éclairer. Nous emprunterons, dans ce but, à M. Oersted une dissertation remarquable des implicité sur un phénomène très peu étudié, l'éclat des corps.

Pour diriger plus facilement l'attention sur le point capital de la question, le savant physicien a pris pour point de départ la contradiction apparente que présente la réunion de la couleur noire et de l'éclat : contradiction qui résulte de ce qu'en vertu de la couleur noire, la réflexion de la lumière serait aussi petite, et en vertu de l'éclat aussi grande que possible. Pour lever cette difficulté, il faut bien distinguer les deux manières dont les surfaces réfléchissent la lumière qui leur a été envoyée par un point lumineux.

Chaque point lumineux est le point de départ d'une série d'ondes de l'éther. Chaque ligne droite, qui de ce point peut être menée perpendiculairement à la surface des ondes, marque une direction d'effet produit, et s'appelle un rayon lumineux. Comme la lumière qui part d'un point et qui tombe sur une surface intercepte un espace conique, la portion ainsi limitée de la série d'ondes lumineuses, l'ensemble ainsi limité à l'extérieur, et composé intérieurement d'un infinité de rayons lumineux, s'appelle un *cône de lumière* ou un *cône de rayons lumineux*. Si le cône de rayons tombe sur une surface plane et polie, il est réfléchi de façon que tous les rayons qui le composent conservent leur position réciproque, en sorte que l'œil reçoit cette lumière réfléchie absolument comme si elle lui arrivait du point rayonnant, avec cette seule différence (qui ne nous importe pas ici), que l'œil, qui ignore le changement de direction, se représente le point rayonnant derrière la surface

polie, à une distance égale à celle où il se trouve réellement devant cette surface. Lorsque la surface polie n'est pas plane, mais qu'elle présente certaines formes régulières comme celle de la sphère, de l'hyperboloïde, du paraboloïde, du cône et du cylindre, les rayons sont encore réfléchis de telle sorte que ceux qui arrivent à l'œil continuent d'appartenir à un même ensemble, à un même cône, dont la forme a été plus ou moins modifiée. On peut dire que les cônes de rayons sont ici réfléchis *indécomposés*, quoique modifiés dans leur forme. On sait que les surfaces qui nous renvoient les cônes de rayons indécomposés nous montrent les images des objets, c'est-à-dire qu'elles sont des miroirs. Si une surface se compose d'un grand nombre de parties très petites, polies, mais séparées les unes des autres, chaque mince cône de rayons, qui est réfléchi par une pareille partie, n'en restera pas moins indécomposé. Le raisonnement nous oblige à considérer chacune de ces petites parties polies comme un miroir; mais la surface, au contraire, considérée comme un tout, ne peut plus être appelée de ce nom. Cependant on ne pourra lui refuser le brillant. Sur chacune des parties brillantes, la réflexion se fait d'après les mêmes lois que sur un miroir, et, à cause de cette circonstance, cette réflexion qu'on a coutume d'appeler la réflexion *régulière;* pourrait être désignée par l'épithète de *miroitante*. Cette dénomination serait plus en harmonie avec la nature intime du phénomène. Si, au contraire, les rayons qui frappent une surface sont rejetés par les parties qui les ont reçus dans toutes les directions possibles, les cônes de rayons primitifs sont *décomposés*. Quoique cet éparpillement des rayons ne soit jamais complet, et ne s'étende pas à toutes les directions, on a pu avec raison appeler ce genre de réflexion *réflexion diffuse;* l'épithète de *décomposante* serait plus significative, et aurait l'avantage d'empêcher les personnes inattentives de la confondre avec la réflexion diffuse que produisent les miroirs convexes, et qui diffère totalement de la précédente.

La lumière qui arrive dans notre œil par la réflexion miroitante ne nous donne nullement la sensation des parties qui la réfléchissent; elle nous rend simplement sensibles la présence de la lumière et l'existence du point lumineux dans le cas où les parties de la surface sont convenablement disposées. Par la réflexion décom-

posante, au contraire, nous arrivons à la connaissance des parties réfléchissantes elles-mêmes. Il paraît aussi que c'est dans cette réflexion qu'une partie des rayons reçus disparaît pour l'espace environnant, ou est *absorbé*, suivant l'expression admise. Souvent l'absorption est plus considérable pour une espèce de rayons, c'est-à-dire pour les ondes lumineuses d'une certaine vitesse ondulatoire, que pour les autres, ce qui a pour effet de donner aux rayons réfléchis une certaine couleur prédominante.

S'il existait une surface qui ne possédât que la réflexion miroitante, elle ne serait pas vue dans l'acception propre de ce mot, quoique son existence se fît remarquer par son action miroitante. Pour la vision proprement dite, elle se comporterait comme si elle était *noire*. Mais sur chaque surface, quelque parfaitement miroitante qu'on la suppose, la lumière éprouve en partie une réflexion décomposante, qui a précisément pour effet d'en faire un objet de la vision proprement dite. D'un autre côté, il n'y a pas de surface sur laquelle les rayons lumineux subissent exclusivement la réflexion décomposante; mais nous disons qu'une surface a ou non *de l'éclat*, suivant que l'une ou l'autre réflexion produit sur nous une impression prédominante.

C'est une observation digne de toute notre attention que les mêmes modifications qui rehaussent l'éclat, affaiblissent la réflexion décomposante, et réciproquement. On s'en assure en polissant une surface mate ou en rendant mate une surface polie. Dans le premier cas, la visibilité des particules diminue à mesure que leur poli atteint un plus haut degré de perfection; et pour quelques surfaces, pour l'acier, par exemple, la couleur propre disparaît au point qu'on est tenté de dire que la surface est noire. Dans le second cas, à mesure que l'on dépolit, ce qui est propre de la substance reprend la portion d'influence qu'il avait perdue. Un coup d'œil rapide sur les observations suivantes, les unes anciennes, les autres nouvelles, fera mieux ressortir cette vérité. Le fer, à l'état pulvérulent ou tel qu'on l'obtient en traitant l'oxide de fer par l'hydrogène, est noir; mais, comprimé, il prend l'éclat et la couleur qu'on connaît au fer. La même remarque s'applique essentiellement à tous les métaux qui peuvent être obtenus à l'état pulvérulent. Un grand nombre d'entre eux, à l'état de division extrême, sont noirs

ou gris, comme le platine, l'argent, le plomb, l'arsenic; d'autres sont colorés, comme l'or, le cuivre; mais, par la compression ou par un certain arrangement des particules, chacun reprend son éclat métallique connu et sa couleur. On se tromperait en admettant que cette relation entre le poli et la réflexion décomposante est exclusivement propre à l'état métallique. Si l'on polit un morceau d'oxide de fer rouge, il prend avec le poli un éclat gris d'acier, et sa rougeur disparait d'autant plus que son poli est plus parfait. La même remarque s'applique au cinabre, à cela près que, dans l'état poli, il possède une couleur qui se rapproche davantage de celle du plomb, ou, si l'on veut, du mercure, bien qu'avec un éclat moins vif. On sait que l'indigo prend par le poli un éclat cuivré. Le bleu de Prusse, soumis à la même opération, prend un éclat particulier bleu foncé. Des expériences analogues s'exécutent en répandant une matière colorante quelconque sur du papier placé sur un corps dur; en la frottant avec un morceau dur et poli de verre, de porcelaine, d'acier, etc., on voit la couleur disparaître à mesure que l'éclat augmente. On peut avec non moins de succès employer dans ces expériences des surfaces peintes, pourvu que la matière qui a servi à fixer la couleur ne soit pas susceptible de prendre un éclat considérable.

Les expériences faites avec toutes ces surfaces montrent que les images qu'elles réfléchissent n'emportent avec elles aucune coloration. Il est vrai qu'on voit souvent dans l'image un reflet de couleur de la surface réfléchissante; mais il est dû à la réflexion décomposante qui accompagne toujours la réflexion miroitante. Plus un miroir se trouve à l'ombre, l'objet étant bien éclairé, moins l'image présente ce reflet accessoire. Dans ce cas, l'image d'un objet coloré quelconque se montre presque entièrement avec sa couleur propre, bien que le corps qui réfléchit cette image à sa surface montre une tout autre couleur dans la réflexion décomposante.

La lumière qui est renvoyée dans l'ombre par une surface sans éclat est, comme on le sait, toujours colorée. Si la même surface est polie, la lumière incolore renvoyée dans l'ombre prédomine dans une proportion qui est toujours en rapport avec le poli. On voit aussi clairement dans la chambre obscure que la lumière miroitante n'a pas la couleur de la surface qui la renvoie, bien qu'elle se

mêle facilement avec une partie de la lumière renvoyée par la réflexion décomposante.

Comme les surfaces de tous les liquides sont polies, elles doivent présenter les mêmes relations, et c'est ce que constate l'observation. Bien qu'on eût d'anciennes expériences sur ce point, M. Oersted l'a pourtant constaté à l'aide de liquides fortement colorés, par exemple de l'encre bleu foncé, de la teinture de tournesol d'un rouge foncé, dans des vases noirs. Des verres colorés se comportent de la même manière.

La lumière renvoyée par la réflexion décomposante n'est point polarisée, tandis que la lumière renvoyée par des surfaces polies donne des signes évidents de polarisation. Bien que ce fait ne soit l'objet d'aucun doute, il sera pourtant intéressant de le voir confirmé par des expériences nouvelles, qui le mettent bien en évidence. On y réussit aisément en polissant la moitié d'une surface mate, et en lui faisant renvoyer la lumière, sous un angle assez aigu, sur un miroir placé sous l'angle de polarisation, et qu'on peut tourner convenablement, ou sur un appareil de polarisation. Si l'on emploie le polariscope de Savart, on aperçoit bien sur la surface sans éclat quelques bandes tout-à-fait ternes ; mais sur la surface polie il se montre des bandes fortement colorées.

On ne remarque pas que la couleur que la surface aurait dans son état terne exerce une influence quelconque sur les couleurs que présentent les bandes dans la lumière polarisée, et ceci encore fortifie la conviction que la réflexion miroitante est sans couleur.

En polissant les matières qu'on n'a pas essayé de polir jusqu'ici, on pourra déterminer l'angle de polarisation de beaucoup de substances et en déduire leur pouvoir réfringent, là où d'autres moyens ne peuvent être employés.

De tout ce que nous venons de dire il résulte que la lumière renvoyée par la réflexion miroitante ne participe point à la production de la sensation de couleur que les corps nous transmettent, mais que cette sensation n'est produite que par la réflexion décomposante. On voit aussi que le blanc et le noir, qu'on appelle des couleurs dans le langage ordinaire, ont cela de commun avec les couleurs proprement dites qu'ils sont produits par la réflexion décomposante.

M. Œrsted se trompe en affirmant que la lumière renvoyée par la réflexion décomposante n'est pas polarisée ; cette erreur assure à M. Arago la priorité de la belle découverte que nous enregistrerons bientôt.

Opinion de Bénédict Prevost.

« Lorsqu'un corps opaque, éclairé par la lumière ordinaire du jour, paraît coloré, rouge, par exemple, comme le cuivre, on dit, dans l'hypothèse d'un fluide subtil, cause occasionnelle des sensations que nous nommons lumière ou couleur, que les divers rayons qui composent la lumière blanche sont tous, à l'exception des rouges, *absorbés* par le corps, tandis que ces derniers sont seuls *réfléchis*.

» Je me sers de ces expressions, lumière blanche, rouge, jaune, etc., parce qu'elles sont reçues, bien que je les trouve très inexactes. Telle lumière occasionne en nous la sensation de blancheur ou de blanc, telle autre celle de rouge, de bleu, etc. Si nous disons, à cause de cela, que ces lumières sont blanches, rouges, jaunes, etc., nous exprimons de la même manière deux choses très différentes ; car nous disons aussi qu'un corps est blanc, rouge, bleu, etc., pour dire qu'il envoie dans nos yeux une lumière qui y produit les sensations que nous appelons blanc, rouge, bleu, etc.

» On dit aussi, par un abus semblable, voir la lumière; mais il est évident qu'on ne voit pas la lumière, quoiqu'elle soit la cause que nous voyons.

» C'est encore abusivement qu'on appelle lumière deux choses très différentes : une sensation, et la cause occasionnelle de cette sensation. Il est vrai qu'au lieu de lumière, on dit quelquefois fluide lumineux. Mais ne serait-il pas plus convenable et plus commode d'exprimer chacune de ces idées par un seul mot ; de dire, par exemple, le lumérique ou le luminique et la lumière, comme on dit le calorique et la chaleur?

» Il y a des circonstances où le mot lumière est employé exlusivement pour la cause ; comme quand on parle de sa vitesse, ou de son action sur certaines substances. D'ailleurs on ne peut pas dire

que la lumière, cause, soit un fluide lumineux, au moins sans amphibologie ; car nous disons d'un corps qu'il est lumineux, lorsque nous supposons qu'il en sort de la lumière, ou du fluide lumineux. On peut penser, à la vérité, qu'il ne saurait y avoir d'équivoque, et qu'il en est de cette expression comme de tant d'autres dont la place détermine toujours exactement l'acception ; mais, à la manière dont on s'en sert quelquefois, il semble qu'on s'y méprenne.

» Je crois que c'est une erreur, ou du moins, qu'il n'est pas exact d'employer le mot réfléchi dans cette acception. La lumière rouge, dans ce cas, n'est pas réfléchie; elle rayonne en tous sens de chaque point de la surface du corps.

» La lumière blanche arrive au corps, ou très près de ce corps ; une partie, subissant une vraie réflexion sans se décomposer, s'éloigne ensuite du corps, en suivant une direction qui fait, avec sa surface, un angle égal à l'angle d'incidence.

» Le reste pénètre plus ou moins dans l'intérieur, où certains rayons sont retenus en vertu de leur affinité pour sa substance ; les autres ressortent en divergeant de chaque point de sa surface, et constituent sa couleur : rouge pour le cuivre, jaune pour l'or, etc.

« Mais comme la profondeur à laquelle ils ont pénétré, quelque petite qu'elle puisse être, n'est cependant jamais nulle, celle d'où ils ressortent ne l'est jamais non plus rigoureusement.

» Ainsi aucun de ces rayons émergents non réfléchis ne suit, en s'éloignant du corps, une direction rigoureusement parallèle à la surface, ni même aussi rapprochée de cette direction que le peuvent faire quelquefois les rayons véritablement réfléchis.

» Si toute la lumière qui n'est pas retenue ou éteinte par le corps, si celle qui constitue la couleur propre du corps, subissait à la surface, ou même, comme on l'entend ordinairement, avant d'y arriver, une vraie réflexion, les rayons très obliques ou parallèles de cette couleur seraient beaucoup plus nombreux que les rayons perpendiculaires ou peu inclinés, et les images des objets vus très obliquement dans ces miroirs seraient plus colorées de la couleur propre du corps que celles qui y seraient vues perpendiculairement ; et il arrive tout le contraire.

» Car, soit A B une plaque d'or polie, ou miroir d'or, et

soit en C, proche du miroir, un objet blanc, ou à peu près, d'argent par exemple, d'étain, d'acier, etc, etc.; l'œil, se trouvant en D dans la perpendiculaire à la surface ou dans une direction peu inclinée à cette perpendiculaire, l'image rapportée en C, au-dessous de A B, paraîtra dorée et à peu près de la couleur même de l'or; tandis que si l'objet est en G et l'œil en H, tous deux dans l'horizontale G H parallèle à A B ou à peu près, à dix ou douze pouces l'un de l'autre (le jour doit venir de I derrière l'observateur; l'œil H et l'objet G sont très près du plan du miroir), l'image sera en tout et en particulier, quant à la teinte, parfaitement semblable à l'objet, sans aucune nuance de jaune.

» Je veux dire sans aucune nuance qui provienne d'une réflexion immédiate; car, si l'objet est placé sur la plaque même, ou qu'il en soit très proche, il réfléchira sur la plaque, ainsi qu'à l'œil, la lumière jaune qu'il en reçoit par rayonnement, et la plaque la réfléchira à l'œil, de manière que la partie supérieure de l'image, ainsi que l'inférieure de l'objet, paraîtra dorée.

» Lors donc que la lumière blanche éclaire l'or, une partie pénètre, est décomposée, et tous les rayons sont retenus, excepté les jaunes qui rayonnent; mais lorsque ces mêmes rayons (jaunes d'or) 'arrivent isolément sur l'or, ils ne pénètrent point, et subissent une réflexion proprement dite: c'est ce que confirment les faits suivants: l'image d'un morceau d'or, vue dans un miroir du même métal, est d'une teinte beaucoup plus foncée que l'objet même.

» Une plaque d'or polie, éclairée par la lumière du jour, rayonne, avons-nous dit, de la lumière jaune et réfléchit de la lumière blanche.

» Qu'on reçoive le tout sur une seconde plaque du même métal également polie, la lumière jaune en sera réfléchie, une partie de la blanche sera décomposée, et fournira par rayonnement de nouvelle lumière jaune qui, jointe à la première, augmentera son intensité; de sorte que l'image de la première plaque, donnée par la seconde, paraîtra beaucoup plus foncée, comme nous avons dit que cela arrive en effet.

» Cette image, réfléchie par la seconde plaque, en donnera une seconde, une troisième plus foncée encore, etc.

» Il est aisé de se procurer de cette manière une image du dou-

zième ou treizième ordre d'un rouge orangé très foncé, qui probablement est la vraie couleur de l'or. Pour obtenir ces résultats d'une manière bien nette, il faut que les plaques soient proches l'une de l'autre, et fassent entre elles de petits angles plans, éclairés intérieurement par une lumière vive; on en approche d'autant plus que le nombre des réflexions successives augmente, parce qu'elle ne se trouve plus alors pâlie par la lumière blanche que la réflexion mêle toujours au rayonnement.

» Je m'attendais à ce résultat. On conçoit, en effet, que le jaune d'or, en se concentrant, pour ainsi dire, ou en se séparant du blanc, avec lequel il est mêlé, doit devenir orangé foncé; mais ce dont j'ai été assez surpris, c'est que la couleur du cuivre, obtenue de cette manière, se rapproche beaucoup de l'écarlate ou couleur de feu. Le cuivre et l'or donnent une couleur qui, peut-être, s'en rapproche encore davantage.

» Au reste, le cuivre dont je me suis servi pourrait n'être pas pur: ce sont des planches destinées à la gravure; et, quant à l'or, j'ai combiné le cuivre doré avec de l'or de bijoux, qui, je crois, est à 833 millièmes (20 karats).

» L'or et l'argent, le cuivre et l'argent, donnent des couleurs semblables à celles de l'or et de l'or, du cuivre et du cuivre, de l'or et du cuivre, dans les réflexions d'ordres inférieurs, sixièmes, septièmes ou huitièmes.

» L'argent sur l'argent donne une teinte jaunâtre de bronze. La vraie couleur de ce métal, quand il est très poli, lorsqu'elle a par conséquent tout l'éclat dont elle est susceptible, paraît dans cette expérience d'un très beau jaune, le même, ou peu s'en faut, qu'on a regardé jusqu'ici comme la couleur de l'or. Cela peut paraître étrange; mais il faut remarquer que ce métal n'est pas d'un blanc pur comme l'émail, par exemple, et qu'à force de réflexions successives, ce blanc se dissipe, et il ne reste à la fin que la couleur qui, mêlée au blanc, donne celle de l'argent.

» J'ai fait cette dernière expérience avec du cuivre argenté et de l'argent de bijoux, puis avec le même cuivre argenté et une petite plaque d'argent très pur.

» Je ne doute pas qu'en variant ces expériences avec d'autres métaux entre eux, ou avec des métaux et des verres colorés spa-

ques, émaux, ou transparents, des bois ou autres substances cirées ou vernies, etc., on n'obtienne des résultats analogues et plus ou moins intéressants.

» L'étain et le fer-blanc donnent chacun à peu près la couleur non épurée du laiton; l'acier, celle du bronze, que m'avait d'abord donnée l'argent mal poli. Mais l'acier que j'ai essayé n'était pas beau et ne présentait pas une surface polie assez étendue pour que j'en aie pu juger avec une certaine exactitude.

» Le laiton prend une riche couleur, d'un jaune beaucoup plus foncé que celui qu'on attribue ordinairement à l'or; mais il tire moins sur le rouge que ne le fait la vraie couleur de celui-ci.

» Les feuilles appelées clinquant, de cuivre écroui, argenté, parfaitement poli et verni à la colle, semblent ordinairement présenter les couleurs les plus éclatantes; mais cet éclat, provenant en très grande partie de la lumière blanche, n'est pas celui de la couleur du corps, qui devient incomparablement plus riche lorsqu'on la dépouille du voile qui ne lui permettait d'agir sur l'œil qu'après avoir perdu la majeure partie de son intensité colorante. On ne saurait se faire une idée de la beauté de ces couleurs épurées qu'après les avoir vues, surtout les rouges et les jaunes, ou celles qui avoisinent cette partie du spectre; car il me semble que les rouges, qui tiennent un peu du bleu, le perdent dans ces réflexions successives; de sorte, par exemple, qu'un clinquant pourpre devient écarlate, et c'est apparemment ce qui arrive au cuivre dont la couleur ordinaire tire sur le rose, et qui paraît aussi dans l'expérience d'une belle couleur de feu.

» Je soupçonne que si les couleurs non épurées de plusieurs corps sont décomposables par le prisme, c'est à cause de la lumière blanche qui y est toujours mêlée dans les expériences ordinaires; que c'est cette lumière qui se décompose et non celle qui seule fait paraître le corps coloré; que la vraie couleur de l'or, par exemple, de l'argent, ou du cuivre, bien épurée, traverserait le prisme sans altération sensible, sauf celle qui pourrait provenir d'un faible reste de lumière blanche, dont il est peut-être impossible de la débarrasser tout-à-fait.

» Je ne suis pas à portée de faire cette expérience avec assez d'exactitude pour que l'on puisse compter sur ses résultats; peut-

être paraîtrait-elle assez importante, et trouverait-on qu'il vaut la peine de l'entreprendre, si elle était proposée par quelque physicien d'un nom un peu moins obscur que le mien.

» Je m'abstiens, pour abréger, de décrire plusieurs expériences que j'ai faites avec d'autres corps colorés, opaques ou transparents, parce qu'on les imaginera bien sans cela, et qu'on les exécutera aisément.

» Lorsque deux surfaces d'une même substance dont on cherche à reconnaître la véritable couleur ont peu d'étendue, au lieu de les tenir à la main, comme il est indiqué dans le mémoire, il vaut mieux les placer sur une feuille de papier noir, de manière que l'une semble faire exclusivement, par rapport à l'autre et à l'observateur, l'office de miroir, et se trouve dans un plan horizontal, tandis que la seconde fait avec ce plan un angle de huit ou dix degrés, ou moindre s'il est possible. On évite par là que les objets environnants ne mêlent leur couleur à celle que l'on veut obtenir. Du reste, il est facile de trouver, soit par le calcul, soit par le tâtonnement, les arrangements et les situations les plus convenables à la réussite de l'expérience; il serait inutile d'entrer à cet égard dans des détails plus minutieux.

» Les physiciens qui répéteront ces expériences trouveront, si je ne me trompe, qu'il n'y a, dans le vrai, aucun métal blanc ni gris, et que tous ceux dont on a coutume de désigner la couleur par ces épithètes, même en ajoutant : avec une teinte bleuâtre, une teinte rougeâtre, etc., ont une couleur propre, vive et décidée, et que cette couleur est souvent rouge, orangée ou jaune, ou tenant de quelqu'une ou de quelques unes de leurs intermédiaires.

» Voici quelques phénomènes qui me paraissent dépendre de la même cause que ceux qui font l'objet de ce mémoire.

Premier phénomène. » Un vase un peu profond de cuivre bien propre et bien poli paraît intérieurement d'un ton de couleur beaucoup plus riche qu'à l'extérieur. On en voit aisément la raison.

Deuxième phénomène. » Un velours coloré paraît toujours plus foncé qu'une étoffe de soie de même couleur; c'est un effet tout semblable à celui dont nous venons de parler (premier phénomène).

Troisième phénomène. » Le brillant des yeux du chat et de plu-

sieurs autres animaux (1) dépend encore en partie d'une cause semblable; en effet, le tapis de l'œil de ces animaux est en quelque sorte velouté.

Quatrième phénomène. » Je regardais une plaque d'étain poli rectangulaire, de quatre pouces sur trois placée horizontalement à qua-

(1) « On avait regardé ce brillant comme une espèce de phosphorence. J'ai prouvé qu'il provient d'une lumière étrangère, réfléchie ou rayonnant du fond de l'œil de l'animal, comme de la surface d'un corps coloré. Aux preuves que j'en ai données (Bibl. Brit., année 1811), on peut ajouter les suivantes :

» 1° Le tapis détaché d'un œil de bœuf, lorsqu'on le place convenablement par rapport à l'observateur, brille de la même manière que l'œil de l'animal vivant dans les mêmes circonstances.

» 2° Qu'un chat ou un chien regarde une personne assise près d'une table sur laquelle est placée une bougie allumée, et de telle sorte que les yeux de l'animal se trouvant dans l'ombre ne soient éclairés que de la lumière réfléchie par les objets environnants; ces yeux paraissent à cette personne brillants comme de petits tisons embrasés; mais ils cessent de produire cet effet aussitôt qu'elle place la main entre la flamme et les objets qui, par leur situation, peuvent réfléchir sa lumière sur les yeux du chat. Ils brillent de nouveau dès qu'on retire la main, etc. Si cette personne a sur ses genoux une serviette étalée, bien blanche, et qu'elle soit d'ailleurs vêtue de noir, que les autres objets environnants soient de couleur obscure, les yeux du chat brillent beaucoup plus que si l'on plie la serviette et qu'on la rejette du côté opposé.

» Un physicien très distingué a cru que les parties réellement phosphorescentes, ou seulement d'apparence phosphorescente des animaux, brillaient le plus dans la dilatation de ces parties; mais les observations de Péron sur le pyrosome ne peuvent s'accorder avec cette opinion, quant à la phosphorescence réelle.

» Et, quant à l'apparente, voici ce que j'ai remarqué :

» Une chatte, qui nourrissait, était avec ses petits dans une caisse, fermée en partie par une planche qu'on enleva assez brusquement comme j'étais présent et assez proche; aussitôt la chatte se leva, me regarda avec des yeux dont la partie brillante était très étendue, de sorte que la prunelle paraissait aussi dilatée que son organisation puisse le permettre. Cela semble, au premier abord, être d'accord avec l'opinion que le brillant est à son maximum dans la dilatation de l'organe qui le produit; mais 1° il est clair que cela provient seulement de ce que la prunelle dilatée met à découvert une plus grande partie du fond de l'œil ou du tapis.

» 2° Lorsque la prunelle, qui n'est qu'un trou, est dilatée, les fibres musculaires rayonnantes de l'iris sont, au contraire, contractées. »

tre pieds de mes yeux, mesure prise dans une direction peu inclinée à la verticale ; cette plaque, éclairée par une lampe à pompe ordinaire, de dix pouces de hauteur, située entre elle et moi, et dont je me cachais la flamme avec la main, me paraissait presque noire.

» Il semble cependant qu'une partie de la lumière blanche qui tombait presque verticalement sur l'étain, pénétrant dans cette substance, devait y être décomposée et rayonner à mes yeux ainsi que dans toute autre direction, de la lumière jaune. Mais celle-ci, dont je ne recevais qu'une très petite partie, n'étant que le résultat d'un seule décomposition, devait être bien faible; d'ailleurs, encore que j'interceptasse la lumière directe de la lampe, mes yeux ne laissaient pas de recevoir une partie de celle que réfléchissaient les objets environnants : or, on sait qu'à la lumière d'une lampe les jaunes clairs paraissent blancs, etc.

» Ce qui me semble prouver que les choses se passent bien ainsi, c'est qu'une plaque de laiton précisément dans le même cas ne paraît pas tout-à-fait aussi noire. La différence est bien sensible, parce que la lumière jaune qu'elle envoie à l'œil, et qui devait paraître blanche, étant plus abondante, diminue davantage l'intensité du noir, sans pour cela donner en aucune manière la sensation du jaune; une plaque de cuivre rouge paraît brune, une plaque d'acier paraît noire comme du velours.

» On pourrait croire que si l'intensité de la couleur du velours est augmentée par la manière dont les fils de soie sont rangés les uns à côté des autres, cela provient seulement de l'obscurité qui règne entre eux ; mais en mêlant du noir à une couleur vive, on la rend plus brune, plus obscure, et non plus vive, plus intense ou plus riche.

» Une draperie de soie d'une couleur brillante a des reflets plus brillants encore qu'on ne peut non plus attribuer à l'obscurité, et qui reconnaissent la même cause; on ne l'imitera pas en peinture en mêlant du noir à la couleur, mais en la ménageant dans toute son intensité, et l'effaçant par le mélange du blanc pour les parties de la draperie d'où la lumière est censée réfléchie directement.

» En résumé, l'on peut dire de toutes les matières opaques colorées, susceptibles de poli, ce que nous venons de dire de l'or : toutes réfléchissent une partie de la lumière blanche, telle qu'elles

la reçoivent, décomposent celle qui pénètre en deux nouvelles parties, l'une desquelles demeure dans le corps, ou du moins n'en ressort pas sous forme de lumière; l'autre rayonne de tous les points de la surface du corps; non pas de la surface mathématique, mais d'une certaine profondeur, qui, pour être très petite, n'est cependant pas nulle. Toutes teignent de leur couleur propre les images des objets voisins vues peu obliquement, et rendent, au contraire, parfaitement nettes et semblables aux objets, celles qui ne sont vues que très obliquement, et cela, sans les entacher de leurs propres teintes. Toutes font subir aux rayons de leur propre couleur, lorsqu'ils leur arrivent isolés (ou sans faire partie de la lumière blanche) une vraie réflexion.

» La couleur de l'or pur bien écroui et poli pouvant être comme un terme fixe, la couleur de l'image d'une surface plane d'or poli, donnée par une surface semblable, sera aussi d'une couleur et d'une teinte déterminée (quoique différente), et la même pour tout observateur placé, ainsi que l'appareil, dans les mêmes circonstances : une seconde image résultant de la première présentera une troisième teinte différente, etc.

» On obtiendra donc, soit avec une seule substance, soit en en combinant deux ou plusieurs ensemble par des réflexions et décompositions successives, sous des angles déterminés, un grand nombre de couleurs ou de teintes différentes, toutes constantes et susceptibles d'être reproduites à volonté avec une grande précision.

» Au reste, l'espèce de colorigrade à la construction duquel ces observations sont peut-être susceptibles de servir de base, ne serait vraisemblablement jamais comparable, pour la commodité et la perfection, à ceux de M. Biot. Cependant telles circonstances pourraient se présenter, ce me semble, dans lesquelles il leur serait peut-être substitué avec avantage.

» Je conclus de ce qui précède : 1° que ce n'est pas par réflexion, mais par rayonnement, qu'arrive à nos yeux la lumière qui nous fait juger que certaines substances opaques sont colorées, et qu'il en est de même, à quelques modifications ou exceptions près, de celles qui sont transparentes;

» 2° Que la couleur propre de ces substances, des premières surtout, est ordinairement pâlie par de la lumière blanche qui s'y

mêle, mais dont on peut la débarrasser par une suite de réflexions mutuelles et de décompositions, de manière que ces couleurs augmentent considérablement. »

M. A. Prevost a beaucoup approché du but; il a reconnu que les couleurs des corps ont leur source dans une vraie radiation; mais il s'est arrêté là, et n'a nullement cherché à déterminer l'essence de cette radiation, sa nature et son comment, si nous pouvons nous exprimer ainsi. Longtemps avant lui Euler avait fait un pas de plus: son explication de la radiation propre des corps est aussi vraie que naturelle; on nous pardonnera de la donner avec tous ses détails, pleins, plus que jamais, d'intérêt et d'à-propos, puisque M. Arago a solennellement adopté cette explication, et lui a donné un nouveau degré de certitude par d'ingénieuses expériences.

Théorie d'Euler.

Il est des corps qui ne sont pas lumineux par eux-mêmes, qui ne nous deviennent visibles qu'autant qu'ils sont éclairés par quelque autre lumière. Dans une nuit obscure, ou dans une chambre bien fermée, on a beau fixer les yeux sur les objets qui se trouvent dans les ténèbres, on ne verra rien. Les corps non lumineux suffisant à éclairer les corps non lumineux, ils font à cet égard à peu près le même effet que les corps lumineux par eux-mêmes. Nous ne voyons rien que par les rayons qui entrent dans nos yeux. Quand nous voyons un objet quelconque, des rayons partent de chaque point de cet objet, et, entrant dans l'œil, y peignent, pour ainsi dire, l'image de cet objet. Puisque nous ne voyons les corps non lumineux que quand ils sont éclairés, c'est qu'il provient de tous ces points des rayons qui ne subsistent que tant qu'ils sont éclairés. Dès que les corps se trouvent dans les ténèbres, ces rayons s'évanouissent; ils ne sont donc pas propres aux corps opaques, et leur origine doit se trouver dans l'illumination. Mais comment l'illumination peut-elle faire produire des rayons aux corps opaques, ou les mettre à peu près dans le même état où se trouvent les corps lumineux qui, par l'agitation de leurs moindres particules, produisent des rayons? Les Newtoniens en admettent la réflexion pour cause. Selon eux, les rayons du corps lumineux qui tombent sur la surface des corps non lumineux en sont réfléchis, parviennent ainsi jusqu'à nous,

pénètrent dans notre œil, et rendent ces corps visibles comme s'ils étaient lumineux par eux-mêmes. Mais, quelque vraisemblable que soit ce sentiment au premier coup d'œil, il renferme tant d'absurdités quand on l'examine de plus près, qu'il est absolument insoutenable ; il est réellement absurde de dire que ce soit par des rayons réfléchis que nous voyons les corps. Le miroir renvoie sans doute les rayons qui y tombent, mais ces rayons ne représentent pas le miroir, qui reste pour nous comme invisible ; ils nous représentent au contraire les objets dont ils sont partis originairement, et la réflexion ne fait autre chose que de nous faire voir ces objets dans un autre lieu ; nous ne voyons pas les objets dans le miroir, mais plutôt derrière. Au contraire, en regardant un corps non lumineux éclairé par le soleil, nous n'y voyons pas le soleil, mais bien la surface de ce corps avec tous ses accidents. En changeant les objets de place devant le miroir, l'apparition change de place ; les rayons réfléchis représentent continuellement à nos yeux de nouvelles images qui répondent à la nature et à la position des objets, au lieu où nous sommes placés, mais ces rayons réfléchis ne nous présentent jamais le miroir même. Au contraire, qu'un corps soit éclairé par le soleil, ou par d'autres corps lumineux ou non lumineux déjà éclairés, de quelque manière que ce corps change de place, ou que nous en changions nous-mêmes, par rapport à lui, l'apparition en est toujours la même ; nous voyons toujours le même objet, et nous n'y remarquons aucun changement qui se rapporte aux diverses circonstances susdites ; ce n'est donc point par des rayons réfléchis que nous voyons les corps opaques. Enfin les rayons réfléchis d'un miroir nous représentent aussi toujours les couleurs des corps d'où ils proviennent originairement, et le miroir où se fait la réflexion n'y change rien ; au contraire, un corps illuminé par un autre, de quelque manière qu'il soit éclairé, nous présente toujours les mêmes couleurs, et l'on peut dire que chaque corps a sa propre couleur ; ce ne sont donc pas les rayons réfléchis qui nous montrent les corps.

» Et en effet, tous les phénomènes prouvent invinciblement que si nous voyons un corps non lumineux, c'est que les particules éthérées dans sa surface (1) se trouvent dans une agitation semblable

(1) Pour plus de clarté, nous substituerons dans tout ce qui va suivre à

à celles dont les particules des corps lumineux sont ébranlés ; avec cette différence, cependant, que l'agitation dans les corps opaques n'est pas à beaucoup près si forte que dans les corps lumineux. Puisque nous voyons les corps opaques mêmes, et point du tout les images des corps lumineux qui les éclairent, comme cela devrait arriver si nous les voyions par des rayons réfléchis à leur surface, il faut que les rayons par lesquels nous les voyons leur soient aussi propres, et leur appartiennent aussi étroitement que les rayons des corps lumineux à ceux-ci. Tant qu'un corps opaque est éclairé, les particules éthérées de sa surface se trouvent donc dans une agitation propre à produire dans l'éther extérieur un mouvement de vibration, tel qu'il faut pour former des rayons et peindre dans nos yeux l'image de leur original. Pour cet effet, il faut que de chaque point de sa surface, il soit répandu dés rayons en tous sens ; ce que l'expérience confirme évidemment, puisque de quelque côté que nous regardions un corps opaque, nous le voyons également dans tous les points ; d'où il suit que tous les points envoient des rayons en tous sens. Cette circonstance distingue essentiellement ces rayons des rayons réfléchis, dont la direction est toujours déterminée par celle des rayons incidents ; de sorte que si les rayons incidents viennent d'une seule région, comme du soleil, les rayons réfléchis ne suivraient qu'une seule direction. Il faut donc admettre que dès qu'un corps non lumineux est éclairé, toutes les particules éthérées qui se trouvent à sa surface sont mises dans une certaine agitation qui produit des rayons, agitation d'autant plus forte que la lumière qui éclaire est plus efficace. Voilà donc quelle est la nature des corps non lumineux : c'est que leurs particules éthérées sont d'elles-mêmes en repos, ou du moins destituées de l'agitation qu'il faut pour produire de la lumière ou des rayons. Mais ces mêmes particules ont une telle disposition, que lorsqu'elles sont éclairées, ou que des rayons de lumière y tombent, elles sont d'abord mises dans un certain ébranlement, ou mouvement de vibration, propre à produire des rayons ; et plus la lumière qui éclaire ces corps est vive, plus aussi l'agitation sera forte. Tant donc qu'un corps non lumineux est éclairé, il se trouve dans le même état que les corps

l'expression *moindres particules* employée par Euler, cette autre, *particules éthérées*.

lumineux, ses moindres particules étant agitées de la même manière, et capables d'exciter des vibrations dans l'éther; avec la différence que dans les corps lumineux cette agitation subsiste d'elle-même, entretenue qu'elle est par une force intrinsèque; au lieu que dans les corps opaques cette agitation est accessoire, étant produite par la lumière qui les éclaire, et entretenue par une force étrangère qui ne réside pas dans le corps même, mais dans l'illumination. Cette explication suffit à tous les phénomènes.

» Mais comment la simple illumination est-elle capable de mettre en agitation les particules éthérées des corps, et précisément dans cette agitation qui engendre la lumière? Le parallèle entre le son et la lumière résout cette difficulté. Les corps lumineux doivent être comparés à des instruments de musique mis en action, ou qui résonnent actuellement. Il est indifférent qu'ils résonnent par une force intrinsèque ou par des causes étrangères, il suffit qu'ils résonnent et fassent du bruit. Les corps non lumineux, tant qu'ils ne sont pas éclairés, doivent être comparés à des instruments de musique hors d'action, ou à des cordes tendues qui sans être touchées ne rendent aucun son. La question étant ainsi transposée de la lumière au son, se réduit à ceci : une corde tendue en repos, se trouvant dans la sphère d'action d'instruments de musique, peut-elle en recevoir quelque agitation et commencer à résonner sans être touchée?

» Or, l'expérience répond évidemment que oui : sous l'action de vibrations préexistantes, la corde vibre et rend le même son que si elle avait été touchée. Cette expérience réussit beaucoup mieux si le son préexistant est celui que la corde peut rendre. Que l'on considère attentivement les cordes d'un piano qu'on ne touche pas, pendant qu'un instrument produit d'une manière intense le son *ut* par exemple, on remarquera que la corde destinée à produire ce même son commence à vibrer sensiblement et même à résonner; quelques autres cordes seront aussi agitées, ce sont celles qui rendront l'octave, la quinte et la tierce du son produit. Pour rendre ce que nous venons de dire plus sensible, considérons deux cordes devant rendre le même son : en frappant l'une, l'autre commencera d'elle-même à vibrer et à résonner. La raison en est évidente : car comme une corde communique à l'air, en vibrant, un mouve-

ment de vibration semblable, l'air, réciproquement agité de ce mouvement, doit faire vibrer la seconde corde, si sa tension la rend susceptible de mouvement; il frappe la corde tant soit peu chaque coup, et la réitération des pulsations à chaque vibration imprime bientôt à la corde un mouvement sensible, puisque les vibrations auxquelles elle est disposée par sa tension conviennent avec celles qui se trouvent dans l'air. Si le nombre des vibrations dans l'air est la moitié, le tiers, ou s'il est exprimé par un rapport simple, la corde ne recevra pas une impulsion à chaque vibration, comme dans le premier cas, mais à chaque deuxième, troisième ou quatrième vibration, ce qui continuera d'augmenter son tremblement, mais pas si fort que dans le premier cas.

»Mais si le mouvement dans l'air n'est dans aucun rapport simple, avec celui qui convient à la corde, l'ébranlement de l'air ne produira aucun effet sur elle; les vibrations de la corde, s'il y en a, ne se rencontreront pas avec celles de l'air; les impulsions suivantes de l'air détruiront, pour la plupart, l'effet que les premières peuvent avoir produit; c'est ce que l'expérience confirme admirablement : aussi, lorsqu'une corde est ébranlée par le seul bruit d'un son, l'effet est plus sensible si le son dans l'air est précisément le même que celui de la corde. D'autres sons qui ont une consonnance avec celui de la corde produiront bien un effet semblable, mais moins sensible, et les dissonances n'en produisent aucun. Cette circonstance a lieu non seulement dans les cordes, mais dans tous les corps sonores. Une cloche sonnera par le seul bruit d'une autre cloche qui est en harmonie avec elle ou qui peut produire le même son, l'octave, la quinte, ou la tierce. L'histoire nous en fournit un exemple dans les verres à boire. Il y avait un homme qui cassait les verres par son cri. Quand on lui présentait un verre, il en examinait d'abord le son en frappant dessus, puis il criait du même ton dans le verre, qui commençait à s'ébranler; il donnait ensuite a sa voix tout le développement possible, et l'ébranlement du verre devenait si fort qu'il se brisait en petits morceaux.

» Après ce que nous venons d'exposer, on ne sera plus surpris qu'un corps puisse recevoir, par la seule illumination dans ses petites particules éthérées, une agitation semblable à celle dont les particules des corps lumineux sont animées, et qui leur donne la

propriété de produire des rayons qui les rendent visibles. C'est donc une vérité constatée que les particules éthérées de tous les corps que nous voyons se trouvent à leur surface dans une certaine agitation, ou mouvement de vibration semblable à celui des cordes vibrantes, mais incomparablement plus vif ou plus rapide, soit que cette agitation soit l'effet d'une force intrinsèque, comme dans les corps lumineux par eux-mêmes, soit qu'elle soit produite par des rayons de lumière préexistants, c'est-à-dire par l'illumination comme il arrive pour les corps non lumineux. Ainsi les rayons du corps éclairant, en tombant sur la surface du corps éclairé, excitent les particules à un ébranlement semblable d'où résultent les rayons qui, en entrant dans nos yeux, y peignent son image. Cette agitation des particules éthérées des corps non lumineux ne dure pas plus longtemps, en général, que l'illumination qui en est la cause. Mais ne pourrait-il pas arriver que cette excitation, une fois imprimée aux moindres particules, se conserve encore pendant un certain temps, comme nous voyons qu'une corde pincée continue souvent à vibrer pendant longtemps? Qui oserait nier que ce cas soit possible, et ne serait-ce pas là l'origine de certaines substances phosphorescentes qui, une fois éclairées, conservent encore quelque temps leur lumière, quand on les porte dans une chambre obscure?

« Mais faisons un pas encore. Il n'est pas douteux qu'il se trouve une différence infinie entre les particules éthérées des corps non lumineux, selon la variété de ces mêmes corps: quelques uns seront plus susceptibles de mouvements de vibrations; d'autres le seront moins; il doit même y en avoir qui n'en sauraient recevoir aucun. Cette différence doit évidemment se rencontrer dans les corps par rapport à la lumière, comme par rapport au son. Par là, tel corps dont les particules reçoivent facilement l'impression des rayons qui y tombent, nous paraîtra brillant; tel autre, au contraire, où les rayons ne causent presque point d'agitation, doit rester obscur et ténébreux. De plus, il doit exister une différence très remarquable parmi ces mêmes particules, à l'égard du nombre des vibrations que chacune, étant agitée, rendra dans un temps donné: ce nombre doit toujours être fort grand; mais il peut encore varier dans des limites fort étendues, selon la petitesse,

la tension et l'élasticité de chacune, comme il arrive dans les cordes, où le nombre des vibrations exécutées peut varier à l'infini. Comme cette différence est essentielle dans les sons, et que l'ouïe en est affectée d'une manière si particulière, on ne saurait douter qu'une différence pareille dans la fréquence des vibrations des molécules lumineuses ne produise un effet tout particulier, et une différence très essentielle dans la sensation que nous appelons vision. Le phénomène produit par cette différence est précisément la diversité des couleurs; car la nature de chaque couleur consiste en partie ou principalement dans le nombre de vibrations de ces particules lumineuses qui nous présentent cette couleur et les exécutent dans un temps donné.

» Chaque couleur simple, comme nous l'avons dit, est liée à un certain nombre de vibrations qui s'achèvent dans un certain temps; de sorte que ce nombre de vibrations par seconde détermine la couleur rouge, un autre la couleur jaune, un autre la couleur verte, etc. Si donc les particules de la surface de quelques corps sont disposées de telle sorte, qu'étant agitées, elles rendent dans une seconde autant de vibrations qu'en exige, par exemple, la couleur rouge, nous nommons ce corps rouge: les rayons partis de ce corps, et qui renferment autant de vibrations dans une seconde, pourront être nommés rouges avec le même droit; et enfin, quand les nerfs du fond de l'œil sont affectés par ces mêmes rayons, et qu'ils en sont frappés presque autant de fois dans une seconde, ils excitent la sensation de la couleur rouge. Ici tout est clair; le parallélisme entre le son et la lumière est si parfait, qu'il se soutient même dans les moindres circonstances. Le même son qu'une corde rendrait étant touchée est le plus efficace à ébranler cette corde, et d'autres sons n'y produisent d'effet qu'autant qu'ils font avec elle une belle consonnance; il en est exactement de même de la lumière et des couleurs. Pour mettre cette vérité en évidence, on prépare une chambre obscure; on fait un petit trou dans un de ses volets, et l'on place devant ce petit trou, à quelque distance, un corps d'une certaine couleur, tel qu'un morceau de drap rouge, en sorte que, lorsqu'il sera bien éclairé, ses rayons entrent dans la chambre obscure. Ce seront donc des rayons rouges qui entreront dans la chambre, l'entrée de toute autre lumière étant défendue: or,

si dans cette même chambre, on tient vis-à-vis du trou un morceau de drap de la même couleur rouge, il sera parfaitement éclairé, et sa couleur rouge paraîtra fort brillante; mais si on substitue un morceau de drap vert, il demeurera obscur, et l'on ne verra presque rien de sa couleur. Réciproquement, si on place en dehors de la chambre un morceau de drap vert, le drap vert intérieur sera parfaitement éclairé, sa couleur paraîtra fort vive. Il en est de même de toutes les autres couleurs, et il semble qu'on ne puisse pas prétendre à une preuve plus éclatante du système des ondulations. On voit par là que, pour éclairer un corps d'une certaine couleur, il faut que les rayons qui y tombent aient la même couleur, ceux d'une couleur différente n'étant pas capables de mettre en mouvement les particules éthérées de ce corps. Cela se prouve encore par une expérience fort connue. Lorsqu'on allume de l'esprit de vin dans une chambre, sa flamme bleue, qui ne peut faire ressortir la couleur rose des visages, les rend fort pâles ; on dirait des figures de mourants. Si quelqu'un, au contraire, porte un habit bleu, cet habit paraîtra tout-à-fait brillant. Or, les rayons du soleil éclairent tous les corps à peu près également; d'où l'on conclut que les rayons du soleil renferment toutes les couleurs à la fois, comme on le démontre réellement. On tire aussi de là cette conclusion, que la couleur blanche n'est rien moins que simple, mais qu'elle est plutôt un mélange de toutes les couleurs simples : aussi voyons-nous que le blanc est également propre à recevoir toutes les couleurs. Pour le noir, il n'est pas proprement une couleur: lorsque les particules éthérées d'un corps sont telles, qu'elles ne sauraient recevoir aucun mouvement de vibrations, ce corps est est noir; ou bien un corps qui ne produit pas de rayons est noir. Ainsi le défaut de rayons produit cette couleur; et plus il se trouve sur la surface de quelques corps de telles particules qui ne sont susceptibles d'aucun mouvement de vibration, plus il paraît obscur et noirâtre. »

Voilà le système d'Euler; résumons-le avec lui. Puisqu'il est certain qu'un bruit est capable de mettre en mouvement les cordes d'un clavecin pour le faire résonner, la même chose doit aussi avoir lieu dans les objets de notre vue. Les corps colorés sont semblables aux cordes d'un clavecin, et les différentes couleurs aux sons diffé-

rents tantôt graves, tantôt aigus. La lumière dont les corps sont éclairés est analogue au bruit auquel le clavecin est exposé; et comme ce bruit agit sur les cordes, la lumière dont un corps est éclairé, agira d'une manière semblable sur les particules éthérées de la surface de ce corps; elle leur fera rendre des vibrations, et il en naîtra des rayons, tout de même que si ces particules étaient lumineuses, la lumière n'étant autre chose que le mouvement de vibration des particules éthérées d'un corps communiquées à l'éther, qui les transmet ensuite jusqu'aux yeux.

Prévost affirmait que les différents corps de la nature vibraient une lumière propre; Euler explique très nettement en quoi consiste ce mouvement vibratoire, quelle est sa cause nécessaire et suffisante. Ce grand et difficile problème : comment les corps nous deviennent-ils visibles avec leur couleur propre, est résolu d'une manière tout-à-fait satisfaisante. Il reste cependant encore un pas à faire; il faut étudier plus intimement l'action des corps de la nature sur la lumière qui les éclaire. La lumière ne nous rend les corps visibles qu'en subissant de leur part une influence qui la modifie profondément. Elle est quelquefois retardée, quelquefois éteinte en tout ou en partie, de manière à présenter un ensemble discontinu de portions brillantes et obscures. Nous avons déjà considéré en elles-mêmes ces raies d'absorption; mais il est nécesaire de les examiner de nouveau d'une manière toute spéciale dans leur rapport avec la couleur propre des corps; nous ne pouvons arriver que par là à l'explication de la lumière colorée que réfléchissent ou transmettent les corps translucides. Un excellent mémoire de M. le baron de Wrede, mémoire qui, par une sorte de fatalité, est resté tout-à-fait ignoré jusqu'ici, va nous révéler à ce sujet des principes trop méconnus, des faits très curieux, l'explication tout-à-fait naturelle de phénomènes très obscurs.

Théorie de M. de Wrede.

Nous ne pouvons nous dispenser de traduire intégralement le beau mémoire de M. de Wrede, inséré d'abord dans les *Annales de Poggendorff*, vol. XXXIIIe, p. 253 et suivantes, et depuis en anglais dans les *Mémoires scientifiques* de Taylor, t. II, p. 477; sous ce titre : *Essai d'explication du phénomène de l'absorption de*

la lumière dans la théorie des ondulations. Indépendamment des excellentes vues théoriques qu'il renferme, ce mémoire contient plusieurs découvertes expérimentales remarquables, celle entre autres des raies qui sillonnent le spectre réfléchi par une lame de mica cylindrique. Nous sommes vraiment heureux de venger ce beau travail de l'oubli auquel il a été voué, et nous en voulons à M. Erman de l'avoir à peine indiqué.

Il semblera au premier abord que nous aurions dû insérer ces pages dans le long article qui avait pour objet les raies du spectre; on verra bientôt qu'elles trouvent non moins naturellement leur place dans la théorie des couleurs. Nous omettons forcément le détail des calculs, dont nous indiquons seulement la marche.

« La précision mathématique avec laquelle un grand nombre de phénomènes lumineux sont expliqués au moyen de la théorie des ondulations, et la simplicité des principes fondamentaux de cette théorie, aussi bien que l'analogie qu'elle présuppose entre les deux organes principaux, la vue et l'ouïe, dont la nature a doué les êtres vivants, pour les rendre aptes à percevoir et à distinguer les objets extérieurs qui les entourent, rendraient cette théorie extrêmement probable en elle-même, alors même que nous ne serions pas assez heureux pour faire rentrer dans ses lois générales tous les phénomènes élémentaires. Quoique nous ne nous regardions pas comme autorisé à prononcer en dernier ressort sur la valeur intrinsèque de cette théorie, nous devons faire observer cependant que tout semble militer en sa faveur, si nous la comparons avec la théorie de l'émission; celle-ci, en effet, avec tous ses moyens auxiliaires si peu probables, ne rend compte que d'un nombre limité de phénomènes lumineux, tandis qu'elle laisse sans explication plusieurs autres phénomènes que la théorie des ondulations, non seulement explique entièrement, mais qu'elle a même prévus avant leur observation.

» La principale objection que l'on faisait à la théorie des ondulations, est qu'elle laissait inexpliqués les phénomènes de la *dispersion* et de l'*absorption*.

« Quant à ce qui regarde la dispersion, Fresnel ne l'avait pas, il

(1) Phil. Mag. and Annals, vol. II, p. 360.

est vrai, expliquée, mais du moins il avait montré qu'elle n'est pas en opposition avec la théorie des ondulations. Il avait prouvé, en effet, que la vitesse avec laquelle la lumière se transmet à travers un milieu élastique n'est indépendante de la longueur des ondes qu'autant que les rayons des sphères d'action mutuelle des molécules du milieu élastique sont assez petits pour qu'on puisse les regarder comme nuls en comparaison de la longueur des ondes. S'il n'en est pas ainsi, la vitesse de transmission pour les ondes lumineuses les plus courtes doit être plus petite que pour les ondes les plus longues, et cette conclusion, la théorie des ondulations peut la regarder comme certaine, parce qu'elle résulte des observations faites sur la dispersion de la lumière. » M. Cauchy, depuis Fresnel, a pleinement résolu le problème de la dispersion.

» J'arrive maintenant à ce qui fait l'objet principal de ce mémoire, l'absorption de la lumière. M. Brewster, qui plus que personne a suivi avec attention les phénomènes relatifs à l'absorption, et qui a agrandi le champ de nos connaissances dans cette branche de l'optique aussi bien que dans les autres, signale (dans le mémoire où il décrit la découverte curieuse que certains gaz colorés jouissent de la propriété d'absorber une innombrable multitude d'espèces de lumière, tandis qu'ils transmettent intactes celles qui leur sont intermédiaires) une série de phénomènes d'absorption qu'il regarde comme contraires à la théorie des ondulations. Entre autres remarques il fait la suivante : « Que la théorie des ondulations soit défectueuse en tant que représentation physique des phénomènes lumineux, c'est ce qui a été admis par ceux qui la défendent le plus ouvertement ; et cette imperfection pour ce qui est relatif au pouvoir dispersif des corps a été établie par sir John Herschell comme une objection très formidable. Je vais montrer maintenant qu'il y a d'autres objections à cette théorie physique, et je laisserai à la franchise du lecteur de préciser si ces objections sont plus ou moins formidables que celle qui précède (1). » Toutes ces nouvelles objections de Brewster contre la théorie des ondulations sont tirées des phénomènes d'absorption.

» M. Airy (1), dans ses remarques sur ce mémoire de Brewster, a

(1) Phil. Mag. and Annals, vol. II, p. 419.

pleinement reconnu, je le sais, que la théorie des ondulations n'a point jusqu'ici donné d'explication des phénomènes d'absorption; mais il a d'un autre côté comparé les deux théories sur d'autres points avec tant de savoir et de clarté, que je regarde comme impossible qu'on puisse, après l'examen de cet ensemble de faits, hésiter un seul instant sur la préférence à donner. Je suis cependant obligé de contredire ce que M. Airy a affirmé relativement à l'absorption de la lumière, si ma manière de voir sur ce sujet est exacte. M. Airy dit qu'il ne pense pas que l'absorption puisse être considérée comme une partie essentielle de la théorie de la lumière. « Ce phénomène, dit-il, est le résultat d'une interruption ou discontinuité intrinsèque, qui tantôt laisse dans toute leur vigueur les lois normales, tantôt détruit pleinement, non les lois, mais ce qui est le sujet de ces lois.» En admettant même cette assertion de M. Airy, je ne vois pas comment on peut arriver à conclure que la théorie de la lumière ne doit pas s'étendre jusqu'aux phénomènes d'absorption. Car si nous présupposons dans les corps certaines propriétés au moyen desquelles ils agissent de manière à troubler les phénomènes lumineux, nous pouvons aussi d'un autre côté présupposer dans la lumière une propriété moyennant laquelle ces phénomènes *seraient disposés à être troublés par les corps*, et nous devrions alors expliquer nécessairement cette dernière propriété par la théorie de la lumière. J'ai suivi avec attention les phénomènes intéressants décrits par Brewster; mais bien loin d'en tirer les mêmes conséquences que lui, j'y trouve au contraire la confirmation complète de la théorie des ondulations.

» Quand j'ai vu pour la première fois le spectre d'une lumière qui a traversé de la vapeur d'iode ou de brome, spectre dont le sillonnement régulier ne laissait aucun doute que toutes les absorptions (il y en a près de cent) ne pouvaient pas être l'effet d'une seule et même cause efficiente immédiate, j'ai été convaincu que le tout était un phénomène d'interférence, quoique je ne pusse pas à cette époque me rendre assez compte de la manière dont il est produit.

» J'essaierai aujourd'hui de faire voir que dès que l'on assigne à la matière une propriété très simple, et nullement en opposition avec les idées que nous nous en formons d'ailleurs, tous les phé-

nomènes que nous comprenons dans la classe des *phénomènes d'absorption* deviennent de purs corollaires du principe général des interférences.

» Sir John Herschell a fait voir dernièrement dans un mémoire sur l'absorption de la lumière par les milieux colorés envisagée dans ses rapports avec la théorie des ondulations (1), mémoire intéressant et instructif sous divers points de vue, la possibilité de considérer les phénomènes d'absorption comme dus à des interférences. Mais il a assigné à chaque absorption individuelle une cause différente, ce qui l'a obligé de supposer dans les corps absorbants autant de causes diverses qu'il y a d'absorptions dans le spectre. On conçoit encore assez facilement deux mille causes agissant séparément dans un seul et même corps, comme ce serait le cas, par exemple, pour le gaz acide nitreux; mais où trouver la raison de la grande régularité qu'il faudrait admettre forcément dans ces cent causes agissant à la fois dans les vapeurs d'iode ou de brome? De plus, sir John Herschell croit que les observations certaines sur l'intensité et l'irrégularité apparente des phénomènes d'absorption, forcent de renoncer à l'idée d'une cause agissant par gradation continue. Il établit plus loin, que « si les phénomènes pouvaient tous être représentés par une expression analytique, cette expression serait d'une nature singulière et compliquée, et renfermerait, pour répondre à toutes les exigences des faits, un grand nombre de constantes arbitraires dépendantes de la relation du milieu avec la lumière, comme aussi des transcendantes d'un ordre élevé et très compliqué.

» Je m'efforcerai de prouver, au contraire, que toutes ces causes peuvent se ramener à une seule, ou tout au moins à un nombre fort limité, et qu'on peut les comprendre toutes sous une expression analytique très simple, qui contient un petit nombre de constantes dépendant uniquement de la nature du milieu absorbant.

» Le peu de connaissance que nous avons sur la constitution intime de la matière ne nous permet pas de prédire l'effet que tel corps produira sur l'onde lumineuse qui le traverse. Si, néanmoins, nous concevons que la matière soit composée de particules

(1) Phil. Mag. and Annals, vol. III, p. 401.

maintenues par de certaines forces à des distances déterminées les unes des autres, nous concevrons aussi que ces particules peuvent offrir une résistance à l'onde lumineuse qui les traverse et la réfléchir par conséquent en partie. La lumière ainsi réfléchie, et se propageant dans une direction contraire à sa direction primitive, peut de nouveau, par une seconde réflexion, reprendre sa direction primitive, la perdre une seconde fois par une réflexion partielle, et ainsi de suite indéfiniment. Ainsi se produit une série indéfinie de systèmes d'ondes lumineuses, dont chacun possède une intensité plus faible que celui qui l'a immédiatement précédé, et qui, si on le compare avec celui-ci, a été diminué d'une quantité proportionnelle au double de la distance qui sépare les deux surfaces réfléchissantes. Si nous nous bornons présentement à considérer les deux premiers systèmes, il est clair que leur résultante peut dépendre de la relation qu'il y a entre la longueur de l'onde lumineuse et la quantité de retard de l'un des systèmes sur l'autre. De sorte que si ce retard est égal à

$$1/2,\ 3/2,\ 5/2,\ 7/2\ldots$$

de la longueur d'onde lumineuse, l'intensité de leur résultante doit être égale à la différence entre les intensités des deux systèmes; et si le retard est égal à un multiple entier de la longueur d'onde lumineuse, l'intensité de la résultante est égale à la somme des intensités des systèmes. Si nous admettons maintenant que des ondes lumineuses de toutes les intensités, depuis la limite la plus longue α, jusqu'à la plus courte β, traversent un milieu qui occasionne un retard φ dans une partie de cette lumière, il est évident que l'intensité de toutes les sortes de lumière dont la demi-longueur d'onde φ est :

$$\frac{\varphi}{3},\ \frac{\varphi}{5},\ \frac{\varphi}{7},\ \frac{\varphi}{9},\ \frac{\varphi}{11}\ldots\frac{\varphi}{2m-1},\ \frac{\varphi}{2m+1},\ \text{etc.},$$

est un *minimum;* qu'au contraire, les espèces de lumière dont la demi-longueur d'onde est :

$$\frac{\varphi}{2},\ \frac{\varphi}{4},\ \frac{\varphi}{6},\ \frac{\varphi}{8}\ldots\frac{\varphi}{2m},\ \frac{\varphi}{2m+2},\ \text{etc.},$$

atteignent leur *maximum* d'intensité.

» Quand ces espèces de lumière sont séparées au moyen d'un prisme, chacune de celles dont l'intensité est un minimum semble absorbée comparativement à celles qui leur sont imtermédiaires, et le spectre tout entier est analogue à celui que présente le rayon de lumière qui a traversé de la vapeur d'iode ou de brome.

» Avant d'aller plus loin dans la comparaison des spectres qui, d'après la théorie, sont dus à un simple retard, et de ceux qui, comme l'expérience le montre, sont produits par des milieux absorbants, j'essaierai de déterminer quelles sont les conséquences des hypothèses faites ci-dessus, à savoir, l'hypothèse d'une série indéfinie de réflexions.

» Supposons que a représente l'intensité primitive de la lumière, r la fraction qui se perd à chaque réflexion, et que b indique la distance entre les deux surfaces réfléchissantes, et rappelons-nous que Fresnel a montré, dans son excellent mémoire sur la diffraction de la lumière (1), que la vitesse de l'ondulation u que chaque particule d'éther reçoit pendant le temps t d'un système d'ondes lumineuses, dont l'intensité est a et la longueur d'ondulation λ, est exprimée par l'équation :

$$(1) \qquad u = a \sin 2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda}\right),$$

dans laquelle x exprime la distance qui sépare les particules du centre de vibration.

» Cette formule servira à déterminer les vitesses d'ondulation u, u_1 u_2, u_3,.... que les particules de l'éther reçoivent du système d'ondes lumineuses dont les intensités respectives sont données par le tableau suivant :

$(1-r)^2a$	0
$r^2(1-r)^2a$	$2b$ (2).
$r^4(1-r)^2a$	$4b$
$r^6(1-r)^2a$	$6b$
$r^8(1-r)^2a$	$8b$
. . . .	. .
. . . .	. .
$r^{2n}(1-r)^2a$	$2nb$

(1) Poggendorff's Annalen der phys. u. Chem., vol. XXX, p. 100.
(2) $2b$ est le retard de chacun des systèmes sur celui qui le précède immédiatement.

a donne directement $(1-r)a$, et celui-ci directement $(1-r)^2a$.

$(1-r)a$ donne par réflexion $r^2(1-r)a$, et celui-ci directement $r^2(1-r)^2a$.

$r^3(1-r)a$ donne par réflexion $r^4(1-r)a$, et celui-ci directement $r^4(1-r)^2a$.

$r^5(1-r)a$ donne par réflexion $r^6(1-r)a$, et celui-ci directement $r^6(1-r)^2a$.

$r^7(1-r)a$ donne par réflexion $r^8(1-r)a$, et celui-ci directement $r^8(1-r)^2a$.

. . . .

. . . .

$r^{2n-1}(1-r)a$ donne par réflexion $r^{2n}(1-r)a$, et celui-ci direct. $r^{2n}(1-r)^2a$.

» La vitesse d'ondulation U, que la particule d'éther acquiert par l'action collective des systèmes d'ondes lumineuses, sera la somme des vitesses u, u_1, u_2, u_3,... u_n, on aura :

$$U = u + u_1 + u_2 + u_3 + ,\ldots + u_n;$$

et par une suite de calculs faciles on trouvera :

$$(2) \qquad U = A.\sin\left[2\pi\left(t - \frac{x}{\lambda}\right) - i\right]$$

» Cette équation étant de même forme que celle qui a servi de point de départ, il en résulte que le système résultant d'ondes lumineuses sera tout-à-fait de même nature que le système primitif, et n'en différera que par l'intensité et la position.

» Il restait à calculer l'intensité A ; M. de Wrede y parvient par une série de transformations élégantes, et trouve définitivement :

$$(3) \qquad A = \frac{a(1-r)^2}{\sqrt{1 - 2r^2\cos 2\pi\frac{2b}{\lambda} + r^4}}$$

» Quand, ajoute M. de Wrede, l'on considère la réflexion partielle à la surface comme la réflexion totale de toute la lumière en con-

tact avec les molécules du corps, il est évident que si, en négligeant la forme de ces molécules, on appelle, comme plus haut, $r\,a$ la portion réfléchie, et par suite $(1-r)a$ la partie qui continue à se mouvoir dans la direction primitive, la quantité totale $r\,a$ ne retournera pas dans une direction contraire, mais cette lumière sera en partie réfléchie dans les différentes directions. Pour se convaincre qu'un pareil changement dans l'hypothèse première ne doit altérer en rien les résultats que nous en avons déduits, il suffit de supposer que la partie $r\,a$ réfléchie en sens contraire est maintenant $r'\,a$; les intensités du système d'ondes primitives seront dès lors :

$$a\,(1-r)^2,\, a\,(1-r)^2\, r'^2,\, a\,(1-r)^2\, r'^4,\, a\,(1-r)^2\, r'^6,\dots$$

» Un calcul semblable donnerait :

$$A = \frac{a\,(1-r)^2}{\sqrt{1-r'^2 \cos 2\pi\frac{2b}{\lambda}+r'^4}}.$$

» Si l'on différentie, par rapport à $\frac{2b}{\lambda}$, cette expression, qui représente l'intensité de l'onde lumineuse résultante, on verra que A deviendra un maximum ou un minimum quand on aura :

$$\sin 2\pi\frac{2b}{\lambda} = o$$

que par suite A sera un maximum si $\frac{2b}{\lambda}$ a l'une des valeurs suivantes :

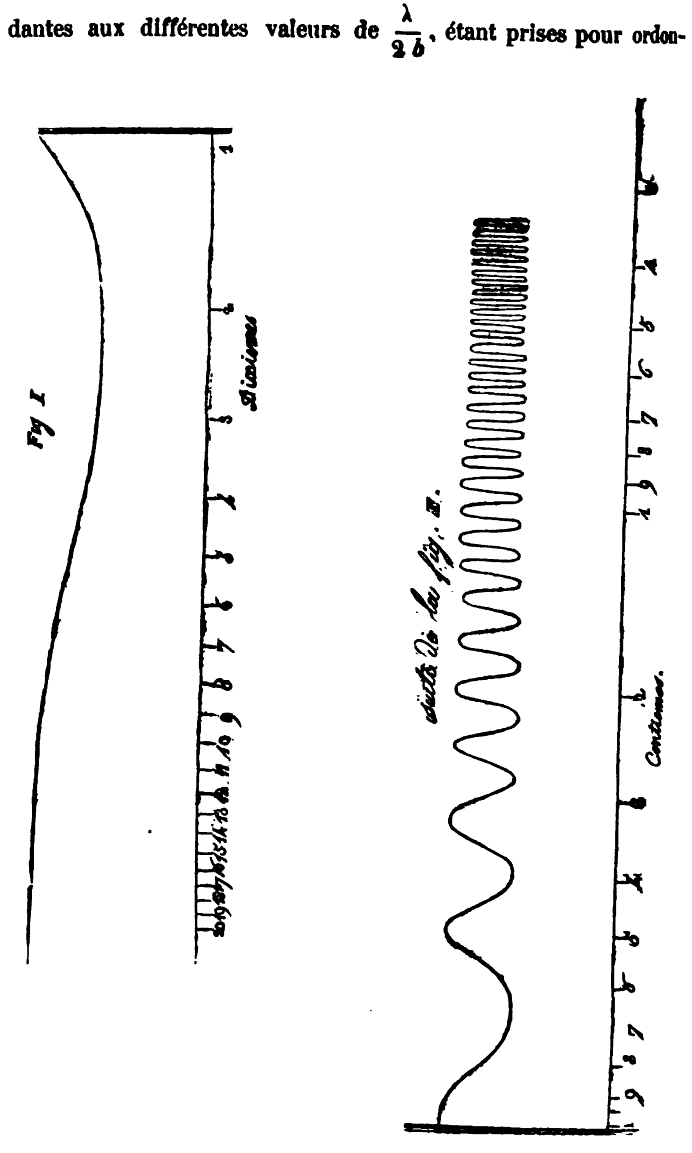
$$0,\ 1,\ 2,\ 3,\ 4,\dots$$

un minimum si $\frac{2b}{\lambda}$ est à égal à

$$1/2,\ 3/2,\ 5/2,\ 7/2,\ 9/2\dots$$

Le système résultant d'un nombre indéfini de systèmes d'ondes devient donc un maximum ou un minimum sous les mêmes conditions précisément que l'onde résultante de deux de ces systèmes seulement. Pour rendre sensible aux yeux l'hypothèse que j'ai mise en avant, j'ai construit dans la figure 1 l'équa-

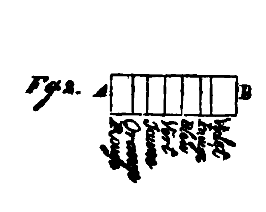
tion (3) de telle manière que les valeurs de l'intensité A correspondantes aux différentes valeurs de $\frac{\lambda}{2b}$, étant prises pour ordon-

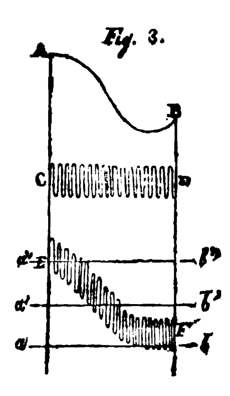


nées, les abscisses soient les logarithmes de $\frac{\lambda}{2b}$. Comme la diffé-

rence entre les logarithmes de deux nombres dépend uniquement de la relation entre ces nombres, et non de leur grandeur absolue, les distances entre deux points de l'axe des abscisses ou les différences entre deux longueurs d'ondulation, ayant entre elles une relation donnée constante, seront indépendantes de la valeur absolue assignée à $\frac{2\lambda}{b}$, et auront par conséquent la même valeur dans toute l'étendue de la courbe.

» Dans le but d'examiner les phénomènes d'absorption qui se manifesteraient dans un spectre pour lequel les longueurs extrêmes d'ondulations, rouges et violettes, seraient entre elles comme 1,58 est à 1, j'ai tracé un spectre, figure 2, dont la longueur était





log 1,58, et dont les divisions rouge, jaune, vert, etc., correspondaient aux longueurs suivantes :

$$\log \frac{\text{rouge extrême.}}{\text{limite entre rouge et jaune.}}$$

$$\log \frac{\text{limite rouge et jaune}}{\text{limite jaune et vert}}, \text{ etc...}$$

» Si, maintenant, on suppose que la distance b entre les surfaces réfléchissantes est très petite, qu'elle est, par exemple, égale à la quarantième partie de la longueur d'ondulation de la lumière rouge, la valeur $\frac{\lambda}{2b}$, qui représente la longueur d'onde de la lumière rouge,

sera égale à 20. Si maintenant on place la figure 2 sur la figure 1, de telle sorte que l'extrémité rouge corresponde à la division 20, on verra que toute la partie de la courbe qui représente le spectre est très voisine du maximum; et l'on en conclura que le corps pour lequel 2 b est égal au vingtième de la longueur d'onde du rayon rouge, absorbe peu de lumière, ou qu'il est transparent, qu'il absorbe toutes les couleurs dans une proportion sensiblement la même, et que, par conséquent, il est incolore.

» Supposons maintenant que 2 b soit plus grand, qu'il soit, par exemple, égal au quart de la longueur d'onde du rayon rouge; il faudra alors placer la figure 2 de telle sorte que l'extrémité rouge corresponde à la division 4; on verra alors que le spectre entier se concentre dans le voisinage du minimum d'intensité, mais que l'extrémité violette est la plus près de ce minimum; d'où l'on doit conclure que le corps est diaphane, et que sa couleur tombe entre les limites du rouge.

» Faisons faire à la figure 2 un pas en avant; supposons, par exemple, que 2 b soit égal à la demi-longueur d'onde du rayon vert; nous trouverons que le spectre entier sera concentré dans le voisinage du minimum d'intensité; que le corps, par conséquent, sera non-diaphane ou opaque, si r est assez grand, et tel que le minimum soit placé dans les limites de notre sphère de vision; dans le cas contraire, il apparaîtra noir.

» Si nous continuons à porter en avant la fig. 2, c'est-à-dire à supposer des retards continuellement croissants, nous obtiendrons des spectres dans lesquels le maximum d'intensité tombera successivement sur le violet, le bleu, le vert, le jaune, et le rouge, et dans lequel les couleurs complémentaires seront plus ou moins absorbées. Supposons maintenant que la quantité r dont dépend, non la condition du maximum ou du minimum, mais la valeur plus ou moins grande de l'intensité, soit différente pour les différents corps; il sera facile alors de concevoir comment les couleurs si variées des corps, comme aussi leur plus ou moins grande transparence, peuvent trouver leur raison et leur explication dans la source que nous venons de signaler (1).

(1) Si nous calculons la résultante des rayons réfléchis dont les intensités seraient ·

» Aussi longtemps que nous donnons à $2\,b$ des valeurs plus petites que le triple ou le quadruple de la longueur d'onde du rayon rouge, nous obtenons pour le spectre une seule place dans laquelle ses deux extrémités soient absorbées ; mais si l'on fait croître b de plus en plus, c'est-à-dire si on fait sans cesse avancer la fig. 2, on verra que le nombre des maxima et des minima du spectre croît indéfiniment avec b. Si l'on suppose $2\,b = 0{,}001$ millimètres, on obtiendra le même nombre de raies d'absorption que dans la vapeur d'iode.

» J'avais désiré de produire artificiellement le même genre de retard que le phénomène de l'absorption suppose, et j'ai été assez heureux pour réaliser d'une manière très simple l'effet d'absorption que j'avais choisi. Pour y parvenir le plus simplement possible et réussir pleinement, il faut courber une lame mince de mica, de manière à lui donner la forme d'une surface cylindrique droite, et la placer à une certaine distance d'une bougie allumée, mais à la même hauteur. La lumière réfléchie par la surface cylindrique arrive à l'œil sous la forme d'une ligne verticale brillante ; elle provient, en partie, de la première face ou de la face antérieure, en partie aussi de la seconde surface ; le retard de cette

$$ra,\ ra\,(1-r)^2,\ ra\,(1-r)^2\,r^2 \ldots.$$

de la même manière que nous avons calculé la résultante des rayons transmis, nous obtiendrons pour son intensité :

$$A = ra\frac{\sqrt{1+2\,(1-2r)\cos 2\pi\frac{2\,b}{\lambda}+(1-2r)^2}}{\sqrt{1-2r^2\cos 2\pi\frac{2\,b}{\lambda}+r^4}}$$

Si l'on différencie cette expression par rapport à $\frac{2\,b}{\lambda}$, on verra que A' devient un maximum quand on donne pour valeurs à $\frac{2\,b}{\lambda}$

$$0,\ 1,\ 2,\ 3,\ 4 \ldots.$$

un minimum quand $\frac{2\,b}{\lambda}$ est égal à l'un des nombres

$$1/2,\ 3/2,\ 5/2,\ 7/2 \ldots.$$

c'est-à-dire dans les mêmes conditions que A. Il résulte de là que ce que nous avons dit de la lumière transmise est également vrai pour la lumière réfléchie, et que, par conséquent, les couleurs naturelles des corps s'expliquent de la même manière pour la lumière réfléchie et la lumière transmise.

seconde portion sur la première dépend de la distance des deux faces ou de l'épaisseur de la lame de mica. Si cette épaisseur est très considérable par rapport à la longueur d'onde; si elle surpasse, par exemple, 0,00025mm, la lumière réfléchie sera tout-à-fait incolore. Si on la décompose au moyen du prisme, et qu'on observe le spectre ainsi formé à l'aide d'une lunette, on verra que l'intervalle du rouge extrême au violet extrême est rempli d'une multitude de raies tout-à-fait noires, et dont le nombre augmente avec l'épaisseur du mica.

» Après avoir montré comment l'on peut expliquer un certain nombre de phénomènes d'absorption par la supposition d'une simple cause retardatrice, je devais désirer de prouver que tous les autres ont lieu par l'adjonction d'une ou de plusieurs causes de retard.

» Si nous supposons qu'un rayon de l'intensité a ayant déjà subi l'action d'un milieu retardateur, et ramené par là à l'intensité

$$A = \frac{a\,(1-r)^2}{\sqrt{1-2r^2\cos 2\pi\frac{2b}{\lambda}+r^4}}.$$

soit soumis de nouveau à une action retardatrice qui, si elle avait été seule, lui aurait donné pour intensité

$$A = \frac{a\,(1-r')^2}{\sqrt{1-2r'^2\cos 2\pi\frac{2b'}{\lambda}+r'^2}}.$$

Il est évident que son intensité A', après les deux retards, sera

$$\frac{A\,(1-r')^2}{\sqrt{1-2r'^2\cos 2\pi\frac{2b'}{\lambda}+r'^4}}.$$

ou

$$A' = \frac{a\,(1-r)^2\,(1-r')}{L.\ M.}$$

en faisant :

$$L = \sqrt{1-2r^2\cos 2\pi\frac{2b}{\lambda}+r'^4},$$

$$M = \sqrt{1 - 2r'^2 \cos 2\pi \frac{2b'}{\lambda} + r'^4}.$$

» L'intensité A'', réduite par l'action de trois causes retardatrices, sera de même :

$$A'' = \frac{a(1-r)^2 (1-r')^2 (1-r'')^2}{L. M. N.}$$

pourvu que l'on fasse encore

$$N = \sqrt{1 - 2r''^2 \cos 2\pi \frac{2b''}{\lambda} + r''^4}.$$

» Il résulte de ces équations que A' ou A'' atteindront un maximum ou un minimum partiel, aussi souvent que l'un des angles

$$2\pi \frac{2b}{\lambda},\ 2\pi \frac{2b'}{\lambda}, \ldots$$

atteindra une circonférence entière ; et l'on devra en conclure qu'il naitra de là, dans le spectre résultant, autant d'absorptions qu'il y en a dans tous les spectres composants réunis. Il est facile, dès lors, de prévoir ce qui résultera de deux ou plusieurs retardements ; il suffira de procéder, comme nous l'indiquerons par un exemple.

» Concevons qu'un rayon de lumière traverse un vase rempli d'iode, et qu'on élève la température de telle sorte, que la densité de la vapeur aille rapidement en augmentant; les phénomènes d'absorption se produiront dans l'ordre suivant : à mesure que la vapeur d'iode se dégage, et que la teinte rouge vif du vase augmente, on aperçoit dans la partie bleue du spectre, ou mieux entre le bleu et le violet, quelques raies noires encore un peu pâles, mais bien dessinées. Ces raies deviennent de plus en plus noires à mesure que la couleur du vase devient plus intense, et en même temps leur nombre augmente. Si l'intensité de la couleur augmente encore, les lignes brillantes qu'on observait dans le bleu diminuent peu à peu de largeur, jusqu'à ce que l'absorption de la partie bleue du spectre soit totale. A mesure que cette absorption totale s'étend du bleu vers la portion rouge, on la voit toujours précédée par des raies noires, jusqu'à ce que la couleur atteigne une intensité telle que le spectre entier soit éteint ou absorbé, à l'exception d'un très petit espace rouge, en-

tièrement couvert de raies noires. Ce brillant phénomène d'absorption s'explique avec la plus grande facilité et la plus grande exactitude, en supposant deux causes distinctes de retard. L'un des retardements devra être au moins égal à la longueur d'onde du rayon rouge, et l'autre cent cinquante fois plus grand. Les parties de la courbe d'intensité qui représentent le premier et le second retardement ont respectivement les formes AB, CD, déterminées par la figure précédente 3. Le résultat de leur action simultanée sera donné par la courbe EF. Pendant que la couleur de la vapeur d'iode devient de plus en plus intense, il faut admettre que r et r' croissent aussi, et que cet accroissement exerce dans son cours une influence appréciable, non seulement sur la position des maxima et des minima, mais plus encore sur la valeur absolue de l'intensité. Plus r et r' sont grands, plus l'intensité diminue. Comme nous devons supposer que la lumière, pour être efficace ou devenir visible, doit avoir une certaine intensité; et comme nous pouvons exprimer par une longueur cette limite de la perception de la lumière, il est évident que l'accroissement de r et de r' doit abaisser la courbe des intensités au-dessous de cette ligne.

» Si maintenant nous plaçons la fig. 2 sur la fig. 3, en supposant que la ligne A B, fig. 2, représente la limite de perception pour l'œil, nous rendrons sensible cet effet d'accroissement de r et de r', en plaçant la fig. 2 plus ou moins haut sur la fig. 3. Si la fig. 2 se trouve au-dessous de la ligne $a\ b$, on verra quelques raies apparaître dans le bleu; si elle monte en $a'\ b'$, l'extrémité du bleu sera absorbée, et les raies se montreront dans le vert; si elle monte encore en $a''\ b''$, le spectre entier sera absorbé à l'exception d'une place rouge, laquelle, à son tour, est couverte de raies. Tel est précisément l'effet produit dans le spectre par la vapeur d'iode.

» Les phénomènes d'absorption des vapeurs de brome s'expliquent exactement de la même manière. Pour rendre raison des modifications produites par le gaz nitreux et l'euchlorine, il faudra admettre un plus grand nombre de causes de retard. Cette pluralité de causes ne doit nullement nous surprendre, puisque ces derniers gaz sont composés, tandis que les premiers doivent jusqu'ici être considérées comme simples. Il est, il me semble, tout

naturel d'admettre que chacun des éléments constituants d'un milieu composé doit être par lui-même une cause de retard ; et si nous considérons le gaz acide nitreux comme un composé d'acide nitrique et de nitrogène, au lieu d'en faire un composé binaire d'azote et d'oxigène, on comprendra plus facilement encore comment il peut se faire qu'il renferme plus de deux causes de retard, dont chacune se produira de la même manière que dans les gaz simples.

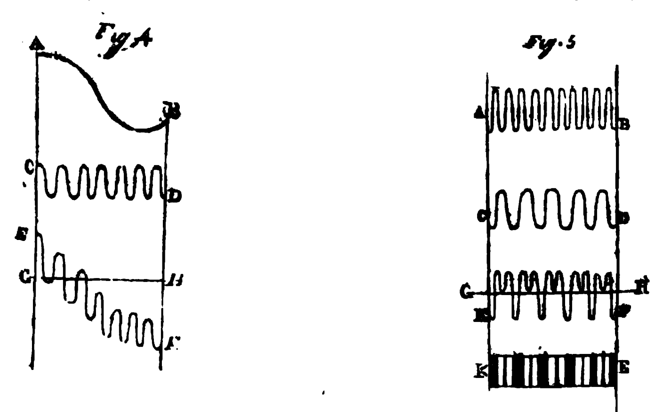
» Sans chercher à rendre absolument compte de ces causes multiples de retard, sans prétendre assigner les propriétés que devrait posséder la matière pour leur donner naissance, je ne puis cependant ne pas mentionner en passant une circonstance qui a excité mon attention et qui mérite peut-être quelque considération.

» La plupart des gaz, lorsqu'ils viennent d'une manière quelconque à faire partie d'un agrégat nouveau, retiennent à très peu près leur couleur première. La cause retardatrice à laquelle nous attribuons la couleur du corps doit, par conséquent, être tout-à-fait indépendante du mode d'agrégation. Les autres causes retardatrices, au contraire, subissent des modifications, lorsque leur condition est changée, parce que le spectre lumineux qui a traversé un corps liquide ou solide ne doit pas présenter les raies noires qu'il aurait s'il avait traversé un gaz. Nous trouvons dans ce fait une certaine raison d'assigner la première cause de retard aux particules mêmes des corps, et la seconde à leurs distances mutuelles, parce que nous devons admettre qu'elles sont changeantes ou variables. Nous ne pouvons imaginer une réflexion de lumière dans l'intérieur d'une molécule, ou une sorte de propagation de lumière à travers sa substance, aussi longtemps que nous considérons cette molécule comme simple. Nous arrivons ainsi à une confirmation probable de l'hypothèse qui admet, comme le voulait Ampère dans son explication des phénomènes de la chaleur, que les corps consistent dans des groupes similaires d'atomes simples, hypothèse qu'Herschell, en la considérant sous un autre point de vue, a présentée comme probable. Quoi qu'il en soit, nous ne pensons pas nous montrer trop hardi en affirmant que nous trouverons dans les observations sur l'absorption de la lumière une voie nouvelle ouverte aux recherches sur la constitution de la matière, voie nouvelle qui conduira peut-être à des résultats qu'on n'aurait pas pu atteindre autrement.

» Les autres faits énumérés par Brewster, comme demeurant sans explication dans la théorie des ondulations, sont expliquées avec la plus extrême facilité dans l'hypothèse que nous avons adoptée.

» Dans le spectre lumineux qui a traversé l'oxalate de chrome et de potasse, toutes les couleurs sont absorbées à l'exception du rouge, qui est sillonné de raies noires. M. Brewster énonce ce fait comme une conséquence de cet autre : l'oxalate permet à l'éther qu'il renferme de vibrer librement pour le rayon rouge, dont l'indice de réfraction dans le flint-glas est de 1,6272, et aussi pour un autre rouge dont l'indice de réfraction serait 1,6274, tandis qu'il est absolument opaque, ou que ses particules éthérées ne vibrent pas du tout pour un rouge intermédiaire dont l'indice de réfraction serait 1,6273.

» Présenté sous cette forme, le fait en question ressemble certainement à un paradoxe; il est cependant facile à expliquer si l'on suppose deux retardements : l'un sensiblement égal en grandeur à la longueur d'onde du rayon rouge, l'autre plus grand, dix fois plus grand par exemple. Par suite du premier retard, la courbe d'intensité prend la forme A B, fig. 4; par suite du second, elle prend la forme C D; la résultante de ces deux courbes a la forme E F. Si, d'ailleurs, nous considérons G H comme la limite de la perception



de l'œil, nous obtiendrons un spectre parfaitement identique à celui décrit par Brewster.

» Les phénomènes qui se manifestent dans le spectre des flammes colorées sont indubitablement en rapport avec ceux que nous avons considérés jusqu'ici, et s'expliquent de la même manière que les phénomènes d'absorption. Mais, en outre de l'hypothèse de retardement, nous devons toujours faire une seconde supposition, à savoir, que certaines flammes ne peuvent produire qu'une lumière d'une certaine longueur d'ondulations, ou du moins que la lumière émise par elles est renfermée entre certaines limites plus resserrées que le rouge et le violet du spectre solaire. Plusieurs des apparences observées dans la lumière des flammes n'ont point d'autre cause. Telle est par exemple, l'origine de la raie brillante, couleur orangée, que l'on observe dans le spectre d'une bougie ordinaire. Si l'on étudie ce spectre, on voit qu'il se compose de plusieurs portions tout-à-fait inégales. La zone intérieure brillante contient, comme on le sait, des molécules à une température élevée, qui ne subissent une véritable combustion que lorsqu'elles arrivent au bord extérieur, ou qu'elles sont en contact avec l'air. La zone extérieure est tout différemment constituée : aussi a-t-elle une tout autre apparence; sa lumière est faible et présente une couleur orangée bien tranchée. La plus basse portion de la flamme est, au contraire, bleue, et ressemble, sous plus d'un rapport, à celle qui résulte de la combustion lente du carbone. Comme cette flamme prend naissance à un point où la mèche arrive au contact de l'air, je regarde comme très probable qu'elle a sa source dans la combustion lente de cette mèche.

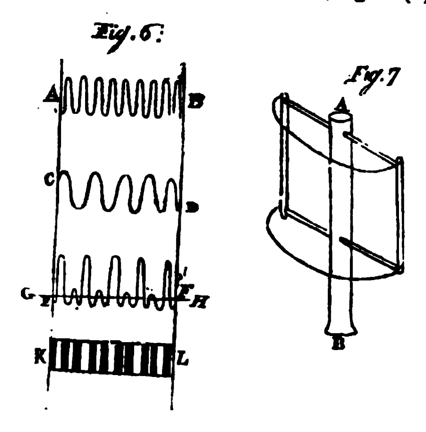
» Si l'on place une lentille convexe entre la flamme et l'ouverture à travers laquelle la lumière vient tomber sur le prisme, on pourra présenter tour à tour à l'ouverture chacune des portions de l'image de la flamme, en déplaçant la lentille, et étudier ainsi toutes leurs particularités. Supposons qu'on ait fait mouvoir l'image agrandie de telle sorte que son bord extérieur seul arrive à l'ouverture, et que, par conséquent, la seule lumière de la zone extérieure puisse la traverser; l'on verra que le spectre ne contient qu'une partie de la bande orangée. Si l'on fait varier la largeur de l'ouverture, on verra que le faisceau orangé varie dans la même proportion, de sorte qu'il se moule complétement sur l'ouverture.

» Si l'on dispose l'image de la flamme de telle sorte que la

portion lumineuse intérieure arrive à l'ouverture, on obtient un spectre complet ; et ce spectre est d'autant plus brillant que la lumière transmise touche de plus près au centre de la flamme, et, en même temps, la bande orangée décroît de plus en plus. Nous concluons de là que la zone intérieure émet une lumière de toutes les longueurs d'ondulations possibles ; que la zone extérieure, au contraire, donne une lumière d'une longueur d'onde unique, c'est-à-dire une lumière complétement homogène. Si l'on regarde une flamme à travers un prisme, sans la contraindre à passer par une ouverture étroite, on obtient naturellement un spectre irrégulier qui contient toutes les couleurs ; mais on y distingue parfaitement une image orangée de la flamme produite par la lumière homogène de la zone extérieure. Si l'on déplace l'image de la flamme de sorte que la seule portion inférieure bleue tombe sur l'ouverture, on obtient un spectre qui contient seulement du violet, du bleu et du vert ; mais en même temps on discerne trois maxima tout-à-fait apparents, disposés régulièrement, et que l'on explique en supposant un retard égal à dix ou douze fois la longueur d'onde lumineuse.

» L'un des plus singuliers spectres de ce genre est, sans contredit, celui qui provient de la combustion de l'alcool mêlé à une dissolution de chlorhydrate de cuivre. Ce spectre est sillonné de bandes brillantes disposées de telle sorte qu'elles se montrent toujours par paires ; une bande noire isole les deux bandes de chaque paire ; les diverses paires sont séparées par une bande plus large, comme dans K L, fig. 5. Pour expliquer ce phénomène, il suffit d'admettre deux retardements, dont l'un soit deux fois plus grand que l'autre, et tellement disposés que les maxima du plus petit coïncident avec les minima du plus grand. La courbe d'intensité aura dans le premier cas la forme A B ; dans le second la forme C D. La courbe résultante aura, par conséquent, la forme E F. Si G H représente la limite de perception de l'œil, il est évident que le spectre se montrera sous l'apparence K L. Supposons, au contraire, que les maxima des deux retards composants coïncident ; que l'une des courbes ait la position A B, fig. 6 ; l'autre, la position C D, la résultante aura la forme E F ; et si G H représente de nouveau la limite de perception de l'œil, il est clair que le spectre produit contiendra des

bandes noires distribuées par paires de deux bandes que sépare une raie brillante, comme on le voit en K L, fig. 6 (1).



» De même que nous avons pu produire avec une seule lame de mica le phénomène de l'absorption dépendant d'un seul retardement, on pourra réaliser avec deux lames le résultat de deux retards. Pour y parvenir, il suffira de faire qu'avant d'arriver au prisme, la lumière réfléchie par une première plaque de mica ait été réfléchie par une seconde. D'après ce que nous avons démontré, le spectre ainsi obtenu contiendra toutes les raies d'absorption que chaque retard, pris séparément, amènerait.

(1) Si, dans la formule d'intensité, on fait $b' = 1/2\ b$, les maxima ou les minima correspondant à b' coïncideront avec les minima de b. Le cas ci-dessus mentionné, de la distribution par paires des bandes brillantes, ne peut, par conséquent, avoir lieu lorsque l'un des retards est exactement le double de l'autre; il est plus probable que dans un cas semblable les bandes apparaissant par paires seront noires. Il est toutefois évident qu'il suffit d'augmenter le plus grand des retards d'une seule longueur d'onde pour obtenir que le maximum correspondant coïncide avec un minimum.

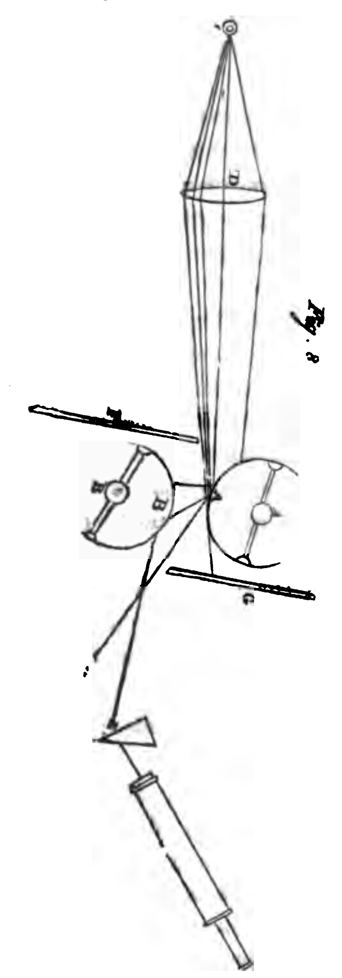
Les autres maxima et minima ne coïncideront pas, il est vrai, complétement; mais ils seront évidemment d'autant plus rapprochés que le retard sera plus grand. Si donc il devient quelque peu considérable, les irrégularités seront si petites que l'œil ne pourra pas les apprécier. On peut supposer que dans la flamme de chlorhydrate de cuivre le plus petit retard s'élève à quarante longueurs d'onde du rayon rouge, ou à soixante longueurs d'onde violette; il suffira d'augmenter d'un 1/80e ou d'un 1/120e le double de cette valeur pour avoir le plus grand des retardements.

» La méthode suivante est la plus simple de celles qu'on peut employer pour réussir dans cette expérience, laquelle, à la vérité, n'explique rien, mais reste, dans tous les cas, une belle expérience de physique. J'ai pris une plaque de mica dont les faces, en outre qu'elles étaient sans défaut aucun, étaient inclinées l'une sur l'autre, de sorte que la plaque était plus épaisse à l'un des bords qu'à l'autre. Parmi les lames de mica que j'ai expérimentées, il en est une qui possède ces deux propriétés dans un haut degré. J'ai courbé cette plaque en cylindre droit, et je l'ai placée de sorte que la lumière était réfléchie sur le prisme par le bord épais ; j'obtins de cette manière un spectre parfaitement régulier, sillonné par plus de 120 raies noires. En faisant tourner le cylindre autour de son axe, de manière à rapprocher successivement l'élément réfléchissant de l'autre bord mince, je voyais croître les distances entre les raies, pendant que leur nombre diminuait ; et à la fin, le bord mince ne donnait guère plus de vingt raies. Pour amener plus facilement le cylindre à la position désirée, je l'attachais à une petite colonne cylindrique, fig. 7, fixée au plan horizontal par de la cire ou une autre substance applicative.

» Pour produire des spectres qui continssent deux séries de raies d'absorption, je plaçais de la même manière en A et en B, fig. 8, pag. 539, deux surfaces cylindriques de mica. La lumière de la lampe C, concentrée au moyen d'une lentille convexe D, arrivait au premier cylindre A ; de ce premier cylindre elle était réfléchie au second B, et parvenait ensuite au prisme E. On empêchait la lumière de tomber directement sur la surface B au moyen d'un écran mobile F ; un second écran G empêchait la lumière d'arriver immédiatement du cylindre A au prisme. En faisant tourner les deux cylindres sur leurs axes, on faisait varier à volonté le rapport des deux retards, et l'on changeait ainsi indéfiniment l'aspect du phénomène d'absorption, le nombre et la disposition des raies, etc., etc. On ne peut obtenir par cette méthode des retards vraiment très petits, par exemple, ceux qui sont moindres qu'une longueur d'onde, parce qu'il est pour ainsi dire impossible de donner aux lames de mica le degré suffisant de ténuité.

» Pour arriver à reproduire expérimentalement ces phénomènes d'absorption dans des circonstances où l'on doit supposer que les

retards sont très petits, j'emploie des fluides colorés renfermés dans un tube cylindrique entre deux plans de verre dont on peut faire varier la distance à volonté. J'ai complétement imité ainsi, au moyen d'un fluide rouge absorbant et d'une lame de mica, non



seulement le spectre des vapeurs d'iode, mais aussi celui qui se forme au moyen de l'absorption dans l'oxalate de chrome et de potasse. Dans ces expériences on peut faire varier les grandeurs r, r' jusqu'à un certain degré, et par conséquent la largeur des raies

noires peut être changée à proportion de la largeur des raies brillantes. Pour obtenir ce résultat, il suffit de faire tomber de la lumière sur une surface cylindrique sous des angles d'incidence successivement différents. Il est évident, en effet, que la proportion entre les quantités de lumière réfléchies, sous la première et la deuxième incidence, doit être d'autant plus grande que l'angle d'incidence est plus petit.

» Voulons-nous produire des absorptions avec une petite différence entre les intensités *maxima* et *minima*, il suffit de faire passer la lumière à travers une lame de mica au lieu de la faire réfléchir. Dans cette expérience, la proportion de lumière transmise peut varier entre des limites très éloignées, si l'on change convenablement l'angle d'incidence.

» Le plus complexe de tous les phénomènes d'absorption est incontestablement celui qui nous montre le spectre solaire avec ses raies noires en si grand nombre et si irrégulièrement distribuées, tantôt plus fortes, tantôt plus faibles les unes que les autres. Si nous supposons avec Herschell que ces raies proviennent d'absorptions qui ont lieu dans les atmosphères du soleil et de la terre, il devient aisé de les expliquer d'après les principes que nous avons déjà posés.

» Quoique je n'aie encore fait aucune expérience dans le but de déterminer si la pression plus ou moins forte des gaz influe sur la position des lignes d'absorptions qui s'y forment, et dans quelle mesure cette influence a lieu, je crois cependant qu'il est très probable qu'elles en ont une considérable. En admettant pour un moment que cette influence soit réelle, il est évident que la lumière en traversant deux atmosphères, dont la densité varie avec la distance à leurs astres respectifs, doit éprouver un nombre indéfini de retards inégaux qui donnent lieu chacun à une certaine série de *maxima* et de *minima*. La cause du nombre des raies noires, comme aussi celle de leur position irrégulière, est donc très facile à concevoir. Mais la différence énorme (au moins en apparence) entre les intensités *maxima* et *minima* demande une explication particulière, que je vais maintenant essayer de donner. Jusqu'ici nous avons considéré seulement deux surfaces réfléchissantes; il est cependant évident que, dans l'hypothèse dont nous sommes parti,

nous devons supposer une série de surfaces semblables qui seront d'autant plus nombreuses que l'épaisseur du milieu absorbant sera elle-même plus considérable. Si nous appelons comme précédemment a l'intensité primitive de la lumière, r la fraction perdue à chaque réflexion, et m le nombre des surfaces réfléchissantes, nous verrons aisément que les intensités des systèmes d'onde de lumière transmis seront, en négligeant les termes multipliés par r^4, r^6, etc.,... (1), celles que présente le tableau suivant.

» Ainsi, les intensités des rayons transmis sont :

$a(1-r)^m$	pour un retard 0
$(m-1)r^2.\ a(1-r)^m$	$2b$
$(m-2)r^2.\ a(1-r)^m\ (1-r)^2$	$4b$
$(m-3)r^2.\ a(1-r)^m\ (1-r)^4$	$6b$
$(m-4)r^2.\ a(1-r)^m\ (1-r)^6$	$8b$
. . . .	. .
$(m-n)r^2.\ a(1-r)^m\ (1-r)^{2n-1}$	$2nb$

Nous aurons par conséquent :

$$u=a(1-r)^m.\ \sin 2\pi\left(t-\frac{x}{\lambda}\right),$$

et semblablement u_1, u_2, u_3,... u_n. Si nous calculons au moyen de ces vitesses la résultante de tous les systèmes d'ondes lumineuses retardés, c'est-à-dire de tous ceux que nous venons précisément de citer, à l'exception du premier, nous aurons pour la valeur U′ de la vitesse correspondante

$$U'=A'.\ \sin\left[2\pi\left(t-\frac{x}{\lambda}\right)-i\right]$$

équation de laquelle il résulte que A′ est l'intensité du système résultant des ondes lumineuses.

(1) Quand l'épaisseur du milieu absorbant est considérable, m doit être un grand nombre, et par conséquent r doit être très petit, car autrement aucune portion considérable de lumière ne pourrait traverser les m surfaces. Tous les membres qui sont multipliés par r^4, ou par une puissance encore plus élevée de r, doivent alors être tellement petits en comparaison de ceux qui sont multipliés par r^2, qu'on peut les négliger.

» Si nous appelons U la vitesse du système résultant de tous les rayons transmis, nous aurons :

$$U = u + U'.$$

L'on ramène cette équation à la forme

$$U = A. \sin \left[2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda} \right) - i \right],$$

et A, qui doit alors exprimer l'intensité de la résultante totale, se détermine d'après la méthode connue, en fonction de A' et de cos i. Une suite de calculs assez longs conduit à trouver la valeur *approchée* de A' et celle de cos i. En substituant pour A' et cos i les valeurs trouvées, on arrive enfin à la formule :

$$A = a(1-r)^m \frac{\sqrt{1 + 2[mr^2 - (1-r)^2] \cos q + [mr^2 - (1-r)^2]^2}}{\sqrt{1 - 2(r-1)^2 \cos q + (1-r)^4}}$$

dans laquelle q remplace pour abréger $2\pi \frac{2b}{\lambda}$.

Si nous différencions cette expression par rapport à q, nous voyons clairement que A devient un *maximum* ou un *minimum* aussi souvent que sin $q = 0$, c'est-à-dire que A devient un *maximum*,

quand $\frac{2b}{\lambda}$ est égal à 0, 1, 2, 3, 4,... etc.,

et un *minimum*

quand $\frac{2b}{\lambda}$ est égal à 1/2, 3/2, 5/2, 7/2, 9/2,.., etc.,

c'est-à-dire dans toutes les mêmes circonstances que s'il y avait seulement deux des surfaces réfléchissantes que nous avions d'abord supposées.

» De là il suit que

$$A \text{ maximum} = a(1-r)^m \left(1 + \frac{mr^2}{1-(1-r)^2} \right)$$

et

$$A \text{ minimum} = a(1-r)^m \left(1 - \frac{mr^2}{1+(1-r)^2} \right)$$

Si nous comparons les intensités *maximum* et *minimum* l'une avec l'autre, nous avons :

$$\frac{\text{A max.}}{\text{A min.}} = \frac{2r+mr^2}{1+(1-r)^2-mr^2} \cdot \frac{1+(1-r)^2}{2r}$$

Si l'on remarque maintenant que r doit être une quantité extrêmement petite, la formule ci-dessus se réduit à :

$$\frac{\text{A max.}}{\text{A min.}} = 1 + \frac{mr}{2}.$$

» On voit donc que le rapport des intensités *maximum* et *minimum* croît avec m, c'est-à-dire avec la densité du milieu absorbant. Ceci nous donne une raison de la différence considérable qu'il y a entre les *maxima* et les *minima* du spectre solaire, lorsque les atmosphères du soleil et de la terre sont les milieux absorbants. Il y a, toutefois, plusieurs circonstances qui, nous le croyons, rendent très incertain le rapport des intensités *maxima* et *minima*. Les flammes de nos lumières, qui suffisent pour éclairer notre chambre le soir, deviennent presque entièrement invisibles dans le jour lorsqu'elles sont exposées à la lumière du soleil. Pareillement, lorsque, par une soirée obscure, nous sortons d'une chambre éclairée, les ténèbres nous semblent si profondes que nous pouvons à peine distinguer les objets environnants : après quelques instants nous les apercevons parfaitement bien. Les corps célestes, qui la nuit brillent avec tant d'éclat, mais qui sont tout-à-fait invisibles le jour, offrent un second exemple du même phénomène. De plus, nous savons que l'œil lui-même se dispose ou se modifie définitivement suivant la plus ou moins grande quantité de la lumière. La contraction et l'extension de la pupille ne sont pas très vraisemblablement les seuls changements que l'œil éprouve dans cette circonstance ; car il est très probable à mes yeux que la rétine elle-même a la propriété de devenir plus ou moins irritable ou sensible. Cette raison explique facilement comment la différence des intensités *maxima* et *minima* pourrait nous paraître très grande sans qu'elle le fût réellement, et comment les intensités de la lumière dans les raies noires pourraient être très considérables, quoi-

que la proximité des raies plus brillantes s'opposât à ce que notre œil perçût cette lumière.

» J'ai déjà fait les préparatifs nécessaires pour prouver par l'expérience l'identité des phénomènes d'absorption avec ceux qui doivent résulter des hypothèses que j'ai mises en avant pour les expliquer, et je vais exposer maintenant en peu de mots les formules que demandent de semblables expériences. J'ai déjà prouvé que, lorsque de la lumière de toute longueur d'onde traverse un milieu qui occasionne un retard c, les intensités de toutes les lumières dont la demi-longueur d'onde est :

$$c, \frac{c}{3}, \frac{c}{5}, \frac{c}{7}, \frac{c}{9} \ldots \frac{c}{2m-1}, \frac{c}{2m+1} + \ldots$$

deviennent *maxima*.

» Pour en conclure actuellement une formule donnant les *minima* qui doivent provenir du retard c, dans un spectre dont les limites extérieures sont α, la plus grande, et β, la plus petite, je désigne leur nombre par s, et je suppose $\frac{1}{2}\alpha$ compris entre :

$$\frac{c}{2m-1} \text{ et } \frac{c}{2m+1};$$

ainsi :

$$\frac{1}{2}\alpha < \frac{c}{2m-1}, \text{ et } \frac{1}{2}\alpha > \frac{c}{2m+1},$$

en outre, je suppose :

$$\frac{1}{2}\beta < \frac{c}{2(m+s)-1}, \text{ et } \frac{1}{2}\beta > \frac{c}{2(m+s)+1}.$$

Nous tirons de là :

$$2m-1 < \frac{2c}{\alpha}, \text{ et } 2m+1 > \frac{2c}{\alpha},$$

ou

$$m < \frac{c}{\alpha} + \frac{1}{2}, \text{ et } m > \frac{c}{\alpha} - \frac{1}{2};$$

m sera par conséquent le plus grand nombre entier que contient

$$\left(\frac{c}{\alpha} + \frac{1}{2}\right).$$

« Nous avons de la même manière

$$m+s<\left(\frac{c}{\beta}+\frac{1}{2}\right), \text{ et } m+s>\left(\frac{c}{\beta}-\frac{1}{2}\right),$$

s sera dès lors le plus grand nombre entier compris dans

$$\left(\frac{c}{\beta}+\frac{1}{2}\right)-m, \text{ et celui compris dans } \left(\frac{c}{\beta}-\frac{1}{2}\right)-m.$$

« Si, au contraire, nous supposons d'avance connu le phénomène d'absorption et que nous recherchions la grandeur du retard qui l'occasionne, nous pouvons d'abord déterminer d'une manière ou d'une autre les longueurs d'ondes correspondantes à la lumière de deux *minima*. Si j'appelle ceux-ci α' et β', et $s-1$ le nombre des absorptions intermédiaires (s désignant le nombre ordinal du minimum dont la longueur d'ondulation est β', calculé d'après celui dont la longueur d'ondulation est α'), et si je suppose que

$$\frac{c}{2m'-1}=\frac{1}{2}\alpha', \frac{c}{2(m'+s)-1}=\frac{1}{2}\beta',$$

nous aurons

$$c=\alpha'\left(m'-\frac{1}{2}\right)=\beta'\left[(m'+s)-\frac{1}{2}\right],$$

d'où

$$m'=\frac{\beta' s}{\alpha'-\beta'}+\frac{1}{2},$$

et, par conséquent,

$$c=\frac{\alpha'\beta' s}{\alpha'-\beta'}.$$

« Quand c est donné, il est aisé de déterminer la différence δ entre les longueurs d'onde de deux *minima* consécutifs, savoir γ et $\gamma-\delta$.

« Si nous supposons

$$\frac{c}{2m'-1}=\frac{1}{2}\gamma, \text{ et } \frac{c}{2m'+1}=\frac{1}{2}(\gamma-\delta),$$

nous avons

$$m'=\frac{c}{\gamma}+\frac{1}{2}, \text{ et } \delta=\frac{\gamma^2}{c+\gamma}.$$

« Pour une autre longueur d'ondulation γ', nous obtenons de la même manière

$$\delta' = \frac{\gamma^2}{c + \gamma'},$$

et, par conséquent,

$$\delta : \delta' :: \frac{\gamma^2}{c+\gamma} : \frac{\gamma'^2}{c+\gamma'}.$$

Si c est très considérable, $\frac{1}{c+\gamma}$ est sensiblement égal à $\frac{1}{c+\gamma'}$, et alors nous avons à très peu près

$$\delta : \delta' :: \gamma^2 : \gamma'^2,$$

formule au moyen de laquelle on peut faire la comparaison entre les résultats des phénomènes observés et les résultats du calcul.

« L'emplacement dans lequel j'ai fait jusqu'ici mes expériences ne m'a pas permis de faire une évaluation exacte des lignes fixes que présente le spectre solaire, quoique ce soit le moyen le plus sûr de déterminer la relation qui lie la réfrangibilité à la longueur d'onde, parce qu'alors on peut faire usage des calculs exacts de Fraunhofer. J'ai pu seulement décider que, pour l'air, la couleur correspondait vraiment à la longueur d'ondulation. Les calculs que j'ai faits jusqu'ici, dans ce but, ne peuvent être considérés que comme des approximations : aussi ne les présenterai-je pas ici. Malgré ce qu'ils offrent d'incomplet, ils m'ont pleinement convaincu que les phénomènes d'absorption et ceux qui doivent résulter des hypothèses que j'ai émises sont identiques. Un exemple de cette identité est cependant digne d'être mentionné, quoique le calcul, je le répète, ne puisse être considéré que comme une approximation. Dans le spectre donné par des vapeurs d'iode, quinze raies occupaient 9′ 30″ depuis l'orangé jusqu'au rouge ; dix raies entre le jaune et le vert occupaient 5′ 30″ ; il faut donc supposer que la distance entre deux raies voisines à la limite du rouge et de l'orangé est de 38″, et qu'à la limite du jaune et du vert elle est de 31″. Or si, maintenant, dans la formule

$$\delta : \delta' :: \gamma^2 : \gamma'^2,$$

nous mettons pour γ et γ', les deux longueurs d'ondes correspondantes à ces limites, et qui sont 0,0000246 et 0,0000219 de pouce anglais, d'après la table d'Herschell, nous avons

$$\delta : \delta' = 38 : 30,6.$$

« Il est d'ailleurs évident de soi que, par la longueur d'ondulation d'une couleur, j'entends parler de la longueur d'ondulation *dans le milieu absorbant ;* et comme, dans les exemples mentionnés, les longueurs d'ondulation ont été prises comme si elles avaient été calculées dans l'air, et que, de plus, j'ai comparé les carrés des longueurs d'ondulation avec la distance de deux *minima* consécutifs, au lieu de les comparer avec les deux longueurs d'ondulation correspondantes, ce qui revient, en réalité, à supposer que la réfrangibilité d'une couleur est proportionnelle à sa longueur d'ondulation ; cet exemple peut bien être considéré comme ne prouvant rien, si ce n'est que le raisonnement et l'expérience sont d'accord pour montrer que les lignes d'absorption dans la couleur verte sont plus serrées les unes contre les autres que dans la couleur rouge.

« Je dois faire observer, en terminant, qu'encore bien que j'aie considéré le retard comme provenant *seulement* de la réflexion entre deux particules, je conçois aussi aisément la possibilité que cette idée puisse être inexacte et que tous les retards puissent provenir de causes qui nous sont encore entièrement inconnues. Mais je crois avoir établi par cet exposé que les phénomènes d'absorption peuvent se ramener à un principe mathématique simple, et que ces phénomènes, en tant qu'appartenant proprement aux corps absorbants, dépendent de certaines grandeurs déterminées qui peuvent être données d'une manière absolue : d'ailleurs, un examen plus approfondi de ces phénomènes, quelle qu'en puisse être la cause, doit toujours être d'un haut intérêt. »

CONCLUSIONS.

Tous les matériaux nécessaires à l'explication des couleurs sont maintenant réunis : nous avons cru devoir reproduire intégralement les théories de Bénédict Prévost, d'Euler, de M. le baron de Wrede, parce que chacune dans son genre ouvre un champ nouveau, et se distingue par des aperçus vraiment fondamentaux, etc., etc. Elles ne

complètent d'ailleurs l'une l'autre ; la vérité ressort de leur ensemble. Il nous suffira maintenant de quelques lignes pour jeter, il nous semble, un grand jour sur cette belle question. Résumons sous ce point de vue cette longue dissertation.

Il résulte de tout ce que nous venons de dire :

1° Que les couleurs, qui sont des formes particulières des rayons lumineux, ont pour cause efficiente, pour raison dernière, les vibrations plus ou moins fréquentes, quoique toujours infiniment rapides, d'un fluide très subtile et très élastique, dont la densité est presque nulle, l'élasticité presque infinie. Les diverses couleurs prises séparément sont constituées par des ondes éthérées dont la longueur d'ondulation varie d'une couleur à l'autre. Le professeur italien Masotti croit avoir démontré, dans un mémoire récent, que les longueurs d'onde du rouge et du violet extrême sont dans le rapport remarquable de 2 à 1. Les autres couleurs correspondent à des longueurs d'ondes intermédiaires entre ces deux nombres.

Les couleurs, d'ailleurs, peuvent être simples ou composées, suivant qu'elles résultent de plusieurs mouvements ondulatoires identiques ou différents. Elles diffèrent entre elles par le ton ou la teinte, l'intensité ou l'éclat, le timbre ou la nuance.

L'opinion de M. Brewster, qui n'admet dans le spectre que trois couleurs primitives distinctes dont le mélange donnerait naissance à toutes les autres teintes, n'est appuyée par aucune preuve concluante et n'est pas même probable. Le mode d'analyse par un prisme transparent est aussi vrai que naturel ; le procédé d'analyse par les corps absorbants est irrationnel et essentiellement défectueux.

2° Les couleurs des corps sont accidentelles et variables, ou essentielles et permanentes. Il y a dans la nature trois grandes sources de couleurs accidentelles et variables : la réfraction, comme dans les couleurs de l'arc-en-ciel, du prisme, du diamant à facettes, etc. ; la diffraction, qui donne aux plumes des oiseaux leurs brillantes nuances, à l'agate ses beaux reflets, aux surfaces à stries très serrées leurs magnifiques réseaux, etc., etc. ; l'interférence, qui reproduit dans tant de ciconstances les couleurs des lames minces, etc.

3° L'opinion qui ramène les couleurs permanentes des corps aux couleurs des lames minces n'est nullement vraisemblable ; elle est

réfutée par mille expériences, mille raisonnements qui la renversent de fond en comble.

4° Il est dès lors inexact de dire que les couleurs des corps sont dues à une vraie réflexion, avec interférence superficielle, comme dans les lames minces ; elles supposent, au contraire, essentiellement, de la part des corps, comme l'a prouvé Bénédict Prévost, une véritable radiation. La lumière qui nous montre les corps colorés sort de l'intérieur de ces corps par une véritable diffusion ; et cette couleur est d'autant plus intense que la réflexion régulière est plus détruite. La réflexion régulière ne peut produire, par rapport aux couleurs, qu'un phénomène analogue à l'*écho*, qui ne s'entend que d'un point déterminé : mais, en outre de l'écho, il y a la *résonnance* d'un corps mis en vibration par communication de mouvement et qui se fait entendre sur tous les points. Les couleurs permanentes des corps sont le produit d'une vraie *résonnance lumineuse*.

5° Il faut donc admettre avec Euler « que les couleurs résultent du mouvement vibratoire qu'éprouvent les particules éthérées des corps, par suite de l'accord existant entre ce que nous pouvons appeler leurs propres tensions et les périodes des ondulations incidentes : les corps dont les molécules éthérées vibrent avec la même facilité sous l'action des ondulations lumineuses d'une longueur quelconque, sont blancs ; les substances colorées, au contraire, sont celles qui vibrent avec plus d'intensité sous l'influence d'une ou de plusieurs espèces d'ondulations, en se montrant moins sensibles aux autres. Un corps est rouge, vert ou bleu, selon que la *tension* de ses particules éthérées se trouve plus *consonnante* avec la période vibratoire des ondulations rouges, vertes ou bleues ; d'où il suit nécessairement qu'une substance dont les particules éthérées vibrent mieux par l'action de telle ou telle autre ondulation lumineuse, est nécessairement colorée (1). »

(1) J'ai emprunté à dessein cette exposition abrégée du système d'Euler à M. Melloni, qui s'est rallié à l'opinion de l'immortel géomètre. M. Melloni, seulement, par mégarde sans doute, au lieu d'attribuer le mouvement aux *particules éthérées* des corps, l'attribue *aux molécules pondérables de la matière*, ce qui me paraît vraiment incroyable. Tout le monde doit admettre, il me semble, que les molécules pondérables en vibrant donnent naissance aux phénomènes du son et non de la lumière. Euler était moins inexact quand il

6° Mais ce n'est pas assez encore ; la lumière, en tombant sur un corps, en mettant en vibration ses molécules éthérées, subit de la part de ce corps une sorte de réaction qui se manifeste par des modifications profondes : une lumière primitive, même blanche, non-seulement se métamorphose en lumière colorée, mais encore devient comme discontinue, sillonnée qu'elle est par une série de raies correspondantes à des maxima et minima d'intensité lumineuse. Il fallait étudier cette influence merveilleuse : c'est ce qu'ont fait MM. Ermann et de Wrede. Ce dernier, dans le mémoire que nous avons reproduit, nous a montré d'une manière sensible comment toutes les raies obscures, toutes les nuances de couleurs, la transparence ou l'opacité plus ou moins complète, pouvaient résulter d'une source unique, d'une sorte particulière d'interférence, ou de retards éprouvés par certaines séries d'ondes renvoyées par les corps dans l'acte de la réflexion diffuse.

M. Ermann, aussi, avait affirmé que les couleurs permanentes des corps avaient leur cause dans l'interférence de la lumière réfléchie à la surface des corps avec celle qui, avant son retour et suivant la nature de la substance, y aurait plus ou moins pénétré ; que les lignes obscures ou déficientes du spectre sont une suite de la production des couleurs. Il serait singulier que cette théorie vraie des couleurs fût, comme le dit M. Ermann, la théorie énoncée autrefois par Newton, mais sous une forme imparfaite, parce que les données de la théorie des ondulations n'existaient pas encore.

7° Enfin, les théories d'Euler et de Bénédict Prévost sont devenues beaucoup plus certaines depuis que M. Arago est venu les appuyer de son autorité et des plus ingénieuses expériences. Voici un résumé succinct de la communication si intéressante faite par l'illustre secrétaire perpétuel dans la séance du 14 octobre 1844.

En analysant avec son polariscope la lumière émanée obliquement des corps incandescents, M. Arago avait reconnu depuis longtemps entre les solides et les gaz une différence essentielle. La lumière émise par les corps solides est polarisée par réfraction, ce qui

disait *petites particules des corps*. Nous reviendrons bientôt, au reste, sur ces distinctions, quand nous étudierons *ex-professo* la différence qui existe entre les phénomènes du son, de la lumière, de la chaleur, de l'électricité, etc.

prouve qu'elle émane en partie des couches intérieures du solide; la lumière envoyée par les gaz est toujours naturelle ou sans polarisation. Ce qui a rendu cette découverte optique si célèbre, c'est l'application que M. Arago en a faite lui-même à la détermination de la constitution physique du soleil, prouvant que la lumière de cet astre émane d'une atmosphère gazeuse, puisqu'elle n'est pas polarisée par réfraction. L'emploi du polariscope à la recherche de la nature de la lumière qui nous rend les corps visibles et des couleurs, a conduit M. Arago à des conséquences non moins remarquables.

Si l'on fait tomber un faisceau lumineux sur une surface blanche et polie, telle qu'une lame de verre opalin, la surface ainsi éclairée envoie à l'œil de la lumière dans deux conditions distinctes, suivant la direction sous laquelle on la regarde. Sous un certain angle, on voit de la lumière réfléchie spéculairement, et qui n'a en quelque sorte fait que rebondir sur la surface; dans toutes les autres directions, on voit une lumière terne qui émane de la surface en se dispersant. Quelle est cette lumière ainsi dispersée? Est-ce une partie du faisceau incident qui s'est brisée pour ainsi dire en éclats, repoussée par les mille molécules ou facettes invisibles dont la surface des corps est hérissée, ou bien est-ce, comme le supposait Euler, le produit d'une sorte d'incandescence suscitée au sein même des corps par l'ébranlement lumineux des rayons incidents? Telle est la question délicate qui était posée aux physiciens, et que M. Arago est venu résoudre de la manière la plus nette.

Avant tout, il faut savoir si la lumière dispersée émane de la couche superficielle ou des couches intérieures. Cette première question est tranchée tout d'abord à l'aide du polariscope. En effet, si l'on analyse successivement la lumière réfléchie spéculairement, et la lumière dispersée, on trouve que ces deux lumières sont polarisées en sens inverse. Comme la première est certainement réfléchie, il faut que la seconde ait été réfractée, et que, par conséquent, elle émane de l'intérieur du corps.

Il reste à savoir, en second lieu, quelle est l'origine réelle de cette lumière réfractée, si elle est une partie du faisceau incident qui, après avoir pénétré dans la masse, en émerge aussitôt, ou bien si elle a été produite au sein même du corps illuminé. C'est cette se-

conde hypothèse qui est la vérité, et voici comment M. Arago le démontre. Il éclaire la lame de verre opalin par un faisceau exclusivement polarisé, et il arrive que le corps ainsi éclairé renvoie dans son polariscope de la lumière polarisée en sens contraire. Ainsi, plus de doute : la lumière qui se disperse à la sortie des corps éclairés a été créée par ces corps eux-mêmes, et il nous faut admettre avec Euler deux sortes de phosphorescences : l'une propre à certaines substances, qui persiste encore après que la lumière qui l'a provoquée a cessé d'agir ; l'autre générale, éphémère, et constituant, au moins pour une partie, le phénomène de la dispersion et des couleurs.

Voilà tout ce qui jusqu'ici a été communiqué au monde savant des études si importantes de M. Arago. Nous pourrions entrer dans plus de détails et développer avec quelque intérêt ces éléments précieux ; mais qui ne sait que le grand physicien expose aussi bien qu'il invente, et que ce serait lui faire injure que de ne pas attendre les admirables développements qu'il nous a promis? Il nous a même annoncé qu'il mesurerait la quantité de lumière ainsi engendrée par les corps à la suite d'un ébranlement extérieur ! Attendons donc pleins d'espérance.

Il nous est donné d'apporter à l'appui de la théorie de M. Arago une expérience ingénieuse due à M. Botzenhart, de Vienne. Si l'on analyse, au moyen de la loupe dichroscopique de M. Haidinger, la lumière réfléchie par les corps colorés, on voit, lorsque le faisceau incident fait un angle suffisamment aigu et que le plan principal du rhomboïde est parallèle ou perpendiculaire au rayon reçu par l'œil, deux images, l'une complètement blanche, l'autre colorée de la couleur même du corps dont il s'agit. Le phénomène devient plus saillant lorsque l'on emploie des surfaces colorées douées d'un certain pouvoir réflecteur ; des papiers colorés, par exemple, des verres colorés, des fluides, des cristaux, etc. : alors, si la surface ne miroite pas trop et si l'angle d'incidence a été convenablement déterminé, la séparation des images blanche et colorée est complète. Avec des surfaces moins réfléchissantes, comme aussi avec des poudres colorées, ainsi que sous d'autres incidences, la séparation est moins tranchée ; les deux images peuvent même devenir sensiblement identiques.

Si, par la méthode que nous venons d'indiquer, on a obtenu une séparation complète, et qu'on place entre le corps coloré et la loupe dichroscopique une plaque de tourmaline parallèle à l'axe, de telle sorte que son plan principal soit parallèle ou perpendiculaire au plan principal du rhomboïde, l'une ou l'autre des deux images disparaît complètement : l'image blanche se montre polarisée dans le plan d'incidence du rayon, l'image colorée dans un plan rectangulaire.

Puisque la lumière ordinaire qui tombe sur une surface et se réfléchit, est toujours polarisée dans le plan d'incidence, la lumière colorée, polarisée perpendiculairement au plan d'incidence, ne peut nullement provenir d'une simple réflexion à la surface; elle doit donc provenir de l'intérieur du corps coloré et avoir subi une véritable réfraction; alors, seulement, on comprendra que son plan de polarisation, comme celui de tout rayon réfracté, soit perpendiculaire au plan d'incidence.

Le phénomène que nous venons de décrire conduit aux deux propositions suivantes :

1° La lumière blanche qui éclaire les corps est réfléchie blanche. L'opinion reçue que les corps colorés réfléchissent quelques uns des rayons composants de la lumière incidente et absorbent les autres, doit être considérée comme inexacte;

2° La lumière colorée qui nous est envoyée par les corps ne provient pas de leur surface, mais de leur intérieur, après avoir subi une véritable réfraction.

Il est assez étonnant que M. Botzenhart, dans sa note, ne rappelle en aucune manière que la seconde de ces propositions a déjà été énoncée et démontrée par M. Arago; il ajoute seulement qu'il a fait, avec de la lumière blanche polarisée et des lumières monochromatiques, une longue série d'expériences qui viennent à l'appui des deux théorèmes qui précèdent.

Étude des lignes d'interférence et des différences de marche des rayons, à l'aide des raies du spectre. — Les recherches curieuses de MM. Fizeau et Foucault sur le phénomène des interférences entre deux rayons de lumière, dans le cas de grandes différences de marche, ont assez de rapport avec les expériences de M. de Wrede pour que nous devions les rapprocher. Reproduisons d'abord l'extrait que ces jeunes et savants physiciens ont donné de leur mémoire :

« Lorsque deux rayons de lumière se rencontrent dans les conditions d'interférence, si l'on augmente par degrés leur différence de marche, on arrive toujours à une limite où le phénomène, après s'être affaibli progressivement, finit par cesser d'être appréciable. L'existence de cette limite s'explique naturellement par la non-homogénéité des faisceaux interférents, et elle est, en effet, d'autant plus reculée que les faisceaux sont constitués par de la lumière plus simple. Cependant, la théorie indique encore une autre cause qui, tôt ou tard, doit mettre un terme aux phénomènes d'interférence, cause tout-à-fait indépendante de la complexité de la lumière, et qui se rattache au mode même suivant lequel se produisent les mouvements lumineux.

» En effet, la non-interférence des rayons émanés de sources différentes, et celle de deux rayons de même origine, d'abord polarisés à angle droit, puis ramenés au même plan de polarisation, mais sans avoir été préalablement polarisés dans un plan unique, ont conduit à considérer le mouvement lumineux comme soumis à des perturbations très fréquentes, lesquelles produiraient de tels changements dans la lumière envoyée successivement par un même point, que si la différence de marche de deux rayons interférents émanés de ce point devenait suffisamment grande, il n'y aurait plus aucun rapport persistant entre les deux mouvements qui se superposeraient; dès lors, le phénomène cesserait entièrement.

» Il était donc intéressant pour la théorie de la lumière de chercher à suivre le phénomène des interférences, dans le cas où la différence de marche serait égale à un très grand nombre d'ondulations.

» Le mode d'observation que nous avons mis en usage pour atteindre ce but est fondé sur les principes suivants : Si un même lieu de l'espace est éclairé par deux faisceaux de lumière blanche émanant d'une même source, mais dont l'un est en retard sur l'autre, le phénomène des interférences ne peut être observé en ce lieu que dans le cas où le retard est peu considérable ; mais au lieu de regarder immédiatement ce lieu lui-même, on peut le prendre comme centre de rayonnement, en isoler une partie limitée par un écran percé d'une fente, et, au moyen d'un système réfringent convenable, former un spectre très pur de la lumière qui en émane.

» Ce spectre, dans lequel on distinguera toutes les raies de Fraunho-

fer si c'est de la lumière solaire que l'on emploie, pourra être considéré comme constitué par la juxtaposition d'un nombre presque infini d'images de la fente rayonnante, chacune desquelles sera formée par des rayons d'une longueur d'ondulation particulière, mais les plus homogènes que l'on puisse obtenir.

» Chacun des éléments du spectre représentera donc, par l'intensité des rayons particuliers qui le composent, le résultat de l'interférence de ces mêmes rayons dans le lieu de l'espace dont il est l'image; en observant le spectre entier, on observera donc simultanément, dans toutes les espèces de lumière simple, les phénomènes produits par la rencontre de deux faisceaux lumineux dans un même lieu de l'espace.

» Les spectres d'interférence sont généralement formés par des bandes obscures et des bandes lumineuses parallèles aux lignes fixes, et qui se succèdent alternativement dans toute la longueur du spectre, en nombre d'autant plus grand que la différence de marche est plus grande entre les faisceaux interférents.

» On remarque que les lignes fixes existant simultanément dans le spectre avec les bandes d'interférence, on peut toujours observer le nombre de ces bandes entre deux limites déterminées; or, ce nombre permet précisément de calculer la différence de marche de deux faisceaux.

» La méthode que nous venons de décrire s'applique aussi bien au cas des interférences produites par deux miroirs inclinés ou par les lames minces, qu'à celui des interférences résultant des vitesses inégales que la double réfraction imprime aux deux rayons dans les lames cristallisées.

» Dans ce dernier cas, on observe le spectre formé par de la lumière qui a traversé une lame d'un cristal biréfringent convenablement placée entre deux prismes de Nicol. »

Parmi les nombres déduits des expériences de MM. Fizeau et Foucault, nous citerons les suivants, pour montrer jusqu'à quelle limite le phénomène a pu être suivi.

Au moyen des miroirs de Fresnel, ils ont observé les interférences lorsque la différence de marche, pour les rayons bleus situés dans le spectre vers la raie F, était de 1,737 ondulations. Par la réflexion aux deux surfaces d'une glace mince, les interférences ont été cons-

tatées lorsque la différence de marche atteignait le nombre de 3,406 ondulations. Avec les lames cristallisées, le phénomène a été suivi pour des épaisseurs remarquables : ainsi, une plaque de cristal de roche parallèle à l'axe, épaisse de $54^{mm}6$, et une plaque de spath d'Irlande aussi parallèle à l'axe, épaisse de $4^{mm}79$, ont donné lieu chacune à des phénomènes d'interférence très nets. Les différences de marche étaient, pour la première, 1,082, et, pour la seconde, 1,692 ondulations.

En terminant ce premier travail, MM. Fizeau et Foucault montraient comment on peut déduire de ce mode d'observation des données précises sur la dispersion de double réfraction. Ce genre d'étude, ajoutaient-ils, offrira un intérêt particulier dans le cas de la double réfraction circulaire du cristal de roche, en permettant de soumettre à une vérification très délicate la loi remarquable trouvée par M. Biot pour la rotation des plans de polarisation des diverses couleurs dans ce cristal. Nous ne connaissons encore ce mode d'observation que par l'énoncé suivant, dû à M. Biot. Étant donnée une plaque de cristal de roche ou de toute autre substance dont le pouvoir rotatoire est censé connu, exposez-la normalement au faisceau blanc, préalablement polarisé en un seul sens ; puis, ayant placé la section principale du prisme analyseur dans une certaine direction angulaire, calculez, d'après les vitesses de rotation assignées aux plans de polarisation des divers rayons simples, quels sont, dans ces circonstances, les éléments chromatiques qui doivent manquer dans l'une et l'autre image. Cela fait, placez après l'analyseur un prisme à réfraction simple, très dispersif, et voyez si les spectres des deux images ainsi développées présentent, dans leur longueur totale, les intermittences prévues. Pour réaliser ce procédé d'expérimentation avec son appareil, M. Biot fixait le prisme dispersif sur l'alidade de l'analyseur par un bras métallique tournant qui permettait de l'amener dans le trajet des rayons ou de l'en écarter à volonté ; puis il interposait antérieurement, dans ce même trajet, une fente métallique étroite, qu'il dirigeait parallèlement à l'alidade, pour obtenir, par cette limitation, des spectres dont les éléments chromatiques de réfrangibilités voisines n'empiétassent pas trop les uns sur les autres. En opérant ainsi, dans les conditions les plus diverses, tant d'épaisseur des plaques que de position angulaire de l'analyseur, on trouve

toujours les intermittences réalisées dans chaque spectre, comme le veut le calcul, tant pour leur place que pour leur nombre. Cette expérience, telle qu'on la réalise avec la lumière des nuées, à travers de médiocres épaisseurs, est très belle ; et l'apparition des intermittences aux points précis de chaque spectre où le calcul les indique, offrira un spectacle très intéressant dans les cours publics, les spectres étant alors formés avec la lumière solaire et reçus en projection sur des tableaux blancs très éloignés.

On voit que les expériences de MM. Fizeau et Foucault ont une certaine analogie avec celles de M. de Wrede : lui aussi, en faisant passer à travers le prisme la ligne lumineuse réfléchie à la surface du cylindre formé par la lame très mince de mica, prenait réellement, comme centre de rayonnement, un espace lumineux où l'interférence avait déjà exercé son action. Mais cette coïncidence dans l'expérience fondamentale n'enlève absolument rien à la gloire de nos deux jeunes physiciens, qui, d'ailleurs, ignoraient complètement l'existence du mémoire de M. de Wrede. Ce qui donne à leurs recherches un caractère tout-à-fait remarquable d'originalité, c'est d'abord le but qu'ils se sont proposé : constater le phénomène des interférences entre deux rayons de lumière dans le cas de grandes différences de marche ; en second lieu, l'idée tout-à-fait heureuse et féconde de comparer le nombre des bandes d'interférence et l'espace qu'elles occupent dans les diverses parties du spectre aux intervalles invariables des raies de Fraunhofer, pour en déduire les différences de marche cherchées ; troisièmement, enfin, les applications ingénieuses qu'ils ont faites des principes fondamentaux établis dans leur mémoire et de leur procédé d'expérimentation. Nous venons de rappeler avec M. Biot une de ces applications ; en voici une autre : Supposons qu'il s'agisse de définir un verre coloré quelconque par la longueur d'ondulation qui lui correspond, c'est-à-dire par la longueur d'onde du rayon qu'il transmet ; voici comment MM. Fizeau et Foucault opèrent : le spectre de Fraunhofer étant projeté dans la chambre obscure par un héliostat qui le maintient immobile, on place le verre devant la fente étroite par laquelle la lumière est admise ; puis, la portion transmise étant reçue sur un écran blanc, on trace au crayon les limites qui la renferment, en y marquant celles des raies très distinctes de Fraunhofer entre lesquelles elle se trouve ; admettons que ces raies

soient B et C, et que le maximum de transmission se trouve à peu près au milieu de l'image, à une distance de la raie la plus réfrangible C, égale, par exemple, à $\frac{8}{9}$ de l'intervalle entre les deux rayons; alors, tirant des expériences de Fraunhofer les longueurs des ondulations propres à ces deux raies et prenant les $\frac{8}{9}$ de leur différence pour les soustraire de l'ondulation de C, on obtient très approximativement la longueur absolue d'ondulation propre au verre dont il s'agit.

Sous le triple point de vue que nous venons de faire ressortir, le travail de MM. Fizeau et Foucault est tout-à-fait neuf, et constitue même, nous le pensons, une véritable découverte.

Disons enfin comment M. Soleil a réalisé récemment l'expérience capitale de M. de Wrede. Pour rendre l'apparition des raies plus distincte et plus frappante, on interpose entre la ligne lumineuse prise sur la surface cylindrique de mica et le prisme une lentille convexe, qu'on rapproche ou qu'on éloigne, suivant que l'on veut voir les raies noires plus distinctement dans le rayon violet ou dans le rayon rouge extrême. Quand la distance de la lentille est la distance focale, la partie la mieux éclairée est la portion moyenne du spectre, et c'est là que les raies obscures apparaissent avec la plus grande netteté. La distance des raies varie avec l'épaisseur de la lame; et si, de fait, cette épaisseur est inégale, comme cela arrive le plus ordinairement, on voit dans le spectre des séries de raies superposées dont la distance varie brusquement d'un étage à l'autre, ce qui produit un effet vraiment étonnant. M. Arago a exigé que M. Soleil donnât à cette curieuse et belle expérience un intérêt tout nouveau. Les lignes d'interférence, on le sait, sont nécessairement dues à l'action mutuelle des rayons réfléchis sur les deux superficies de la lame; mais il était important de faire ressortir distinctement ce grand fait. M. Soleil y est parvenu en introduisant, d'après les indications de M. Arago, dans l'intérieur de la lame cylindrique de mica, un liquide qui a sensiblement le même pouvoir réfringent, de l'huile de cassia, par exemple; aussitôt le liquide introduit, le rayon cesse de se réfléchir à la surface intérieure : comme il n'y a plus de seconde réflexion, il ne doit plus y avoir, par conséquent, de lignes d'interférence : avec l'adjonction du liquide, les raies noires doivent

donc disparaître ; or, c'est ce qui a lieu en effet, et elles s'évanouissent spontanément dès que, par l'action d'une petite pompe foulante, l'huile de cassia a rempli le cylindre : elles reparaissent dès que l'action de la pompe vient à cesser. Il y a plus, si, par l'addition d'alcool, on diminue le pouvoir réfringent de l'huile, la réflexion redevient possible en partie, les raies apparaissent de nouveau, mais faibles.

L'appareil présenté par M. Soleil à l'Académie est très-simple, et il a, comme nous venons de l'expliquer, le double avantage de mettre en évidence dans toute sa splendeur le brillant phénomène des interférences, et d'en démontrer la cause, en prouvant invinciblement comme le veut la théorie des ondulations, que les interférences sont le résultat de la neutralisation de deux rayons ayant entre eux une différence de marche. Quand, après avoir répété sous toutes ses formes cette ingénieuse expérience, on se reporte par la pensée à quinze ou vingt ans, et qu'on se rappelle que deux ou trois physiciens au plus, à cette époque, avaient aperçu les lignes d'interférence produites par les deux miroirs inclinés de Fresnel et les raies de Fraunhofer, on peut à peine s'expliquer les immenses progrès que l'optique expérimentale a faits depuis quelques années, grâce surtout à l'habileté si persévérante et si infatigable de M. Soleil. Cet artiste, autrefois simple ouvrier, aujourd'hui parfaitement initié aux secrets les plus inaccessibles de l'optique moderne, avait trouvé de son côté, comme MM. Fizeau et Foucault, le fait découvert par M. de Wrede, et l'aurait déjà réalisé il y a plusieurs années, s'il avait été mieux encouragé. Remarquons qu'au lieu de courber en cylindre la lame de mica, il serait peut-être plus simple, suivant l'observation de M. Arago, de la laisser plane, et d'y faire réfléchir une ligne lumineuse : on pourrait aussi substituer au mica le verre soufflé; il serait alors plus facile de trouver un liquide d'égal pouvoir réfringent qui rendrait plus impossible la réflexion à la seconde surface.

Protestons, enfin, contre les perturbations fréquentes auxquelles, suivant certaines idées théoriques, les mouvements lumineux seraient soumis ; les expériences de MM. Fizeau et Foucault prouvent éloquemment que dans l'émission du rayon il y a calme et régularité.

SECTION SEPTIÈME.

DES COULEURS ACCIDENTELLES OU SUBJECTIVES. — DE LA PERSISTANCE DES IMAGES. — DU CONTRASTE. — DE L'IRRADIATION. — DU DALTONISME, ETC.

Le moment est venu de distinguer nettement entre les couleurs purement objectives et les couleurs subjectives.

Définitions. — Les couleurs *objectives*, que nous avons seules étudiées jusqu'ici, sont celles dans lesquelles l'œil n'entre que comme organe de la vision, comme instrument plus passif qu'actif, comme percevant simplement un phénomène extérieur, sans contribuer en aucune manière à sa production. Les couleurs du spectre solaire, celles produites par la réfraction, celles par lesquelles les corps se montrent à nous, etc., sont des couleurs objectives.

Les couleurs *subjectives* sont celles qui sont produites, au moins en partie, par l'œil lui-même, par une certaine réaction de l'organe de la vue, sous l'influence d'une première sensation. Si, par exemple, quand on a fixé attentivement la couverture jaune très-éclairée d'une brochure, on l'ouvre rapidement, les pages blanches apparaissent inondées de lumière bleue : cette lumière bleue, évidemment, n'est pas quelque chose de réel, ce n'est pas une couleur objective, c'est certainement un phénomène produit dans l'œil lui-même, un phénomène subjectif. Ces dernières couleurs ont été appelées aussi *accidentelles* et *physiologiques*. La première dénomination nous semble bien préférable ; nous l'adopterons ordinairement dans l'analyse que nous allons donner des recherches relatives à cette nouvelle classe de phénomènes lumineux.

RÉACTION DE L'ŒIL. — Pour mettre d'abord dans tout son jour cette propriété remarquable que l'œil possède de réagir sous l'impression d'une lumière plus ou moins vive, et de devenir en quelque sorte actif, de passif qu'il était, reproduisons en partie la lettre adressée à Locke par le grand Newton, sur les images déterminées dans l'œil par l'action de la lumière solaire :

« J'ai fait une fois sur moi-même et au péril de mes yeux, l'observation dont vous faites mention et qui se trouve dans le livre des couleurs de M. Boyle. Je m'y pris de la manière suivante : Je regardai avec l'œil droit, et pendant un instant très court, l'image du soleil réfléchie sur un miroir ; je tournai ensuite mon œil vers un coin obscur de la chambre, en clignotant, pour observer l'impression qui en était résultée, savoir le cercle coloré qui entourait l'image du soleil, et qui, s'affaiblissant par degrés, finissait par disparaître. Je répétai ce mouvement une seconde, puis une troisième fois. A la troisième fois, lorsque l'image lumineuse et les couleurs qui l'entouraient eurent presque immédiatement disparu, et lorsque je les regardais avec tension, dans la supposition que je cesserais bientôt complètement de les apercevoir, je vis avec étonnement qu'elles reparaissaient de nouveau, et que peu à peu elles devenaient aussi vives et aussi fortes qu'elles l'étaient au moment où je venais de contempler le soleil.... Je fus obligé, pour recouvrer l'usage de mes yeux, de me tenir dans une chambre obscure pendant trois jours entiers.... Je ne recouvrai parfaitement la vue qu'en m'abstenant de fixer des objets brillants. »

Cette observation et mille autres prouvent surabondamment que quand la portion de la rétine excitée par la présence d'un objet lumineux, est subitement soustraite à cette action, l'impression produite par cet objet ne s'évanouit pas aussitôt, mais qu'elle persiste encore pendant un intervalle de temps très sensible. Arrêtons-nous quelques instants, avec M. Plateau, sur ce phénomène capital, dont dépendent, en partie du moins, les couleurs subjectives.

PERSISTANCE DES IMAGES. — Tout le monde sait que lorsqu'on agite rapidement un charbon ardent dans l'obscurité, on voit des courbes lumineuses, comme si le charbon laissait dans l'œil la trace de son passage. Ces apparences résultent évidemment de ce que l'impression produite par le charbon en un point quelconque de sa course, subsiste encore pendant quelque temps après qu'il s'est éloigné de ce point, de sorte que les positions successives de l'objet lumineux doivent paraître simultanées. C'est à la même cause qu'il faut rapporter une foule d'apparences qui se montrent toutes les fois que nous regardons un objet animé d'un mouvement rapide. Ainsi, les soleils d'artifice lui doivent une partie de leurs brillants effets ; la

pluie et la grêle, au lieu d'offrir pendant leur chute l'aspect de corps arrondis, présentent celui de lignes parallèles ; les dents d'une roue qui tourne rapidement disparaissent et semblent remplacées par une gaze demi-transparente, à travers laquelle on peut distinguer les objets ; une corde en vibration présente un effet analogue, etc.

On peut encore observer directement le phénomène de la persistance des impressions en fermant subitement les yeux et les couvrant avec un mouchoir, après avoir regardé un objet lumineux d'un éclat suffisant, une fenêtre, par exemple ; on voit alors l'image de l'objet persister quelque temps.

Mesure de la durée des impressions. — Bien que cette persistance des impressions se reproduise à chaque instant et dans une foule de circonstances, et qu'elle ait d'ailleurs reçu plusieurs applications utiles et curieuses, elle a été fort peu étudiée. D'Arcy eut le premier l'idée de mesurer la durée du phénomène, en faisant mouvoir dans l'obscurité un charbon ardent, de manière à obtenir l'apparence d'un anneau lumineux. On conçoit, en effet, que si l'on parvient à donner à l'objet une vitesse telle qu'il repasse en chaque point de sa course, précisément à l'instant où l'impression produite par son passage va s'évanouir, la durée de l'impression sera mesurée par celle d'une révolution. D'Arcy concluait de ses expériences que la durée de l'impression produite sur son œil par un charbon ardent était égale à 8‴, ou 0″,13. Cette méthode est défectueuse ; elle donne, non la durée complète de l'impression, mais seulement le temps pendant lequel cette impression s'est maintenue sans perte sensible. Pour obtenir exactement la durée totale de l'impression, il faudrait que la vitesse de l'objet fut telle qu'il retrouvât, en chaque point de sa course, l'impression précédente affaiblie au point d'être près de s'évanouir complètement, ce qui est presque impossible. M. Plateau est parvenu cependant à surmonter en partie ces difficultés, et il a déterminé la durée totale des impressions produites sur son œil par des objets blancs, jaunes, rouges ou bleus, éclairés par la lumière du jour. Les valeurs, pour les différentes couleurs employées, sont sensiblement égales : leur moyenne est 0″,34, au lieu de 0″,13 trouvé par D'Arcy : ce résultat n'est qu'une première approximation.

Durée du temps nécessaire à la production de l'impression. —

Les expériences de ce genre établissent avec évidence l'existence d'un autre fait trop peu remarqué : savoir, qu'il faut aussi un temps très sensible pour qu'une impression se forme sur la rétine d'une manière complète. C'est ce qu'on avait déjà pu conclure de ce fait bien connu qu'un objet qui passe très rapidement devant l'œil se distingue à peine, ou même ne s'aperçoit pas du tout. L'expérience suivante met la chose hors de doute : Que l'on fasse mouvoir circulairement devant un fond noir un petit objet blanc, un petit morceau de papier, par exemple, avec une vitesse telle que l'anneau apparent présente une teinte parfaitement uniforme et tranquille, cet anneau ne paraîtra pas blanc, mais gris. Or, il suit de l'uniformité de la teinte que, pendant la durée d'une révolution, l'impression produite s'est maintenue sans perte sensible ; donc, si cette impression était blanche, l'anneau entier devrait évidemment paraître sensiblement blanc et non gris : il faut donc qu'à raison du petit espace de temps pendant lequel l'objet agit sur chaque point de la rétine, il ne produise qu'une impression grise, c'est-à-dire une impression blanche imparfaite.

Personne n'a essayé de mesurer le temps nécessaire à la production complète de l'impression. Quant au temps pendant lequel une impression donnée conserve une intensité sensiblement constante, M. Plateau est arrivé aux conclusions suivantes :

Lois de la persistance des images. — 1° L'intervalle de temps pendant lequel une impression se conserve sans perte sensible est d'autant plus grand que l'impression est moins intense.

2° Ce temps, pour l'impression complète que produisait sur l'œil de M. Plateau un papier blanc bien éclairé par la lumière du jour, est moindre que 0″,008. Pour un papier jaune, il est un peu plus grand que pour un blanc ; pour un papier rouge, il est plus grand encore, et plus encore pour un papier bleu.

Ces limites peuvent être de beaucoup dépassées quand les impressions ont peu d'intensité. On voit, d'après ces résultats, qu'on ne peut pas dire en général, comme en parlant du cas particulier d'un charbon ardent, que, pour obtenir une sensation continue, il suffit de répéter un éclat lumineux huit ou dix fois par seconde. Ainsi, pour produire sur l'œil de M. Plateau la sensation continue d'une blancheur telle que celle d'un papier bien éclairé par la lumière du jour,

il fallait, d'après le nombre donné précédemment, que l'éclat de lumière fût répété plus de 125 fois par seconde.

3° La durée totale de l'impression paraît être d'autant plus grande que cette impression est plus intense. Lorsque l'objet qui a produit l'impression est très lumineux, tel que le soleil couchant, et que l'on se couvre les yeux, l'impression subsiste quelquefois pendant plusieurs minutes. Chez certaines personnes, l'imagination peut exercer une grande influence sur ces sortes de phénomènes.

4° La durée totale de l'impression paraît être d'autant plus grande qu'on a regardé l'objet pendant un temps plus court, pourvu toutefois que ce temps soit suffisant pour développer une impression complète. Lorsque, par exemple, M. Plateau jetait les yeux sur une fenêtre petite et isolée, et qu'il les portait aussitôt sur un endroit sombre de la chambre, il voyait distinctement l'image persister en s'affaiblissant pendant environ trois secondes, avec ses panneaux lumineux et ses châssis obscurs. S'il regardait la fenêtre un peu plus longtemps, la durée de l'image devenait moindre ; et, enfin, après une contemplation prolongée de la fenêtre, l'image était si fugitive qu'il avait peine à en saisir la trace.

5° Lorsque l'impression provient d'un objet très lumineux, tel que le soleil couchant ou même une fenêtre, elle passe ordinairement par une série de couleurs différentes. Ainsi, quand après avoir regardé une fenêtre pendant un instant très court, M. Plateau se couvrait les yeux avec un mouchoir, il voyait l'image des panneaux lumineux devenir successivement rouge, violette, bleue, encore violette, blanchâtre, puis verdâtre et verte. Ces phénomènes, qui paraissent très variables avec les circonstances de l'expérience, n'ont pas encore reçu d'explication satisfaisante.

5° Enfin, lorsque l'impression qui persiste sur la rétine provient d'un objet brillant, il arrive aussi quelquefois qu'elle disparaît et reparaît plusieurs fois de suite avant de s'évanouir complètement. C'est, par exemple, d'après Darwin, ce qui a lieu lorsqu'on a regardé le soleil couchant pendant quelques instants, de manière à ne pas trop se fatiguer la vue, et qu'on observe ensuite, les yeux fermés et couverts, la persistance de l'impression produite.

Kaléidophone. — M. Wheatstone a fait servir la persistance des impressions à montrer aux yeux le mode de vibrations transversales

d'une verge élastique fixée par l'une de ses extrémités. Il suffit, pour cela, que la verge soit terminée par une petite boule métallique polie, ou par une petite sphère creuse de verre, étamée à l'intérieur, et que l'appareil soit exposé au soleil ou à la lumière d'une bougie. Lorsqu'on met la verge en vibration, soit au moyen d'un archet, soit en l'écartant de sa position d'équilibre et l'abandonnant ensuite à elle-même, le point brillant que le soleil ou la bougie font naître sur la petite boule produit, par son mouvement rapide, l'apparence de courbes lumineuses très belles et plus ou moins compliquées, selon la forme de la verge et le son qu'on lui a fait produire; chaque système de vibration et chaque son a ainsi leur image : M. Wheatstone a donné à ce joli appareil le nom de *kaléidophone*.

Photomètre de M. Wheatstone. — Un autre instrument du même savant anglais, établi sur le même principe et que nous décrirons plus tard sous le nom de *photomètre*, produit des apparences plus singulières encore. Il consiste essentiellement à faire tourner excentriquement un disque de liége sur lequel on a fixé un plus ou moins grand nombre de petites boules semblables à celles dont nous venons de parler, et disposées sous forme de polygones réguliers ou irréguliers. Chacune des boules éclairées par un même rayon lumineux donne, dans sa rotation, naissance à une courbe, et ces diverses courbes, en s'enchevêtrant, dessinent les plus curieux dessins.

Chronoscopes divers : moyens d'apprécier l'instantanéité ou la durée de divers phénomènes. — M. Wheatstone a encore imaginé des procédés très curieux, fondés également sur la persistance des impressions, et qui lui ont permis de prouver l'instantanéité de certains phénomènes lumineux, tels que l'étincelle électrique, ou d'en apprécier la durée, quelque courte qu'elle soit. Nous ne dirons ici qu'un mot de ces procédés, que nous avons longuement décrits dans notre volume sur la télégraphie électrique. L'un d'eux consiste à observer le phénomène par réflexion dans un miroir auquel on donne un mouvement très rapide, et de telle nature qu'en supposant l'objet lumineux permanent, son image semble décrire un grand cercle. Cela posé, si le phénomène est instantané, l'image ne pourra se voir qu'en un seul point de ce cercle et ne paraîtra pas déformée; si, au contraire, le phénomène a une durée appréciable, l'image s'allongera de manière à former un arc d'autant plus grand que cette durée sera

plus considérable, et l'on conçoit que d'après la grandeur de l'arc aperçu, on pourra mesurer la durée du phénomène lumineux. Une étincelle électrique observée de cette manière ne paraît nullement s'allonger, d'où il suit qu'elle doit être regardée comme instantanée. M. Wheatstone a rendu sensible à l'œil, de cette manière, la discontinuité de certaines flammes ou de certains traits lumineux qui, à l'œil nu, semblent parfaitement continus, tels qu'un courant d'étincelles électriques reçues à une très petite distance d'un conducteur. La lumière se trouvant ainsi, dans un instant très court, éparpillée sur une ligne extrêmement étendue, la moindre discontinuité devient visible, et c'est pourquoi le courant d'étincelles présente alors l'aspect d'une série de points lumineux séparés par des intervalles noirs.

Voici comment M. Wheatstone a encore démontré l'instantanéité de l'étincelle électrique : On prend un disque de carton blanc sur lequel on a dessiné en noir une figure quelconque ; on fait tourner ce disque avec une grande rapidité, dans son plan, autour d'un axe fixe ; il résulte de ce mouvement de rotation qu'on ne peut plus distinguer la figure tracée sur le cercle, et que celui-ci ne présente plus alors qu'une série de bandes concentriques de teintes différentes : c'est un résultat évident de la persistance des impressions. Cela posé, qu'on mette le cercle en mouvement dans une chambre parfaitement obscure, et qu'il soit subitement éclairé par une étincelle électrique, aussitôt on apercevra très distinctement la figure comme si elle était dans un état d'immobilité parfaite, et cela quelle que soit la vitesse donnée au cercle. Or, cet effet ne pourrait avoir lieu si l'étincelle avait une durée sensible, car alors la figure se verrait dans plusieurs positions successives, et il en résulterait une confusion d'autant plus grande que la durée de l'étincelle se prolongerait davantage.

M. Wheatstone s'est servi encore de ce procédé pour détruire, dans certains cas, les fausses apparences que la persistance des impressions donne aux objets qui se meuvent rapidement. En effet, ces objets n'étant éclairés, par ce moyen, que pendant un temps infiniment court, ils ne se montrent que dans une seule position, et l'impression qu'ils produisent ayant une durée sensible, on peut alors juger de leur forme véritable. C'est ainsi que M. Wheatstone est parvenu à voir très distinctement au microscope les roues mobiles de l'infusoire appelée *rotifère*.

Nous avons décrit longuement, dans le volume déjà cité et dans la première partie de cet ouvrage, le parti que MM. Arago, Wheatstone, Dove, ont tiré de ces mêmes principes pour mettre en évidence la durée des éclairs, la discontinuité de leur lumière, la vitesse de l'électricité, l'inégale vitesse de la lumière dans les différents milieux réfringens, etc., etc.

Autres procédés pour mettre en évidence la continuité ou la discontinuité de divers phénomènes. — Savart a fait usage, dans un cas particulier, d'un procédé qui l'a conduit également à rectifier de fausses apparences résultant d'un mouvement rapide, et lui a permis de déterminer la figure réelle d'une veine liquide qui s'écoule par un orifice circulaire percé en mince paroi. Son appareil consiste essentiellement en un large ruban dont la surface est partagée en bandes transversales alternativement blanches et noires, et auquel on peut donner un mouvement rapide dans le sens de sa longueur. Le liquide étant supposé s'écouler verticalement, on place le ruban mobile derrière la veine et dans une position parallèle à celle-ci. Alors, si on imprime à l'appareil un mouvement suffisamment rapide, l'œil, placé devant le système, peut distinguer les diverses particularités que présente la veine, telles que les renflements annulaires qui se propagent le long de la portion de la veine contiguë à l'orifice, portion qui, sans le secours de cet instrument, paraît unie comme une tige de cristal. L'effet produit par cet appareil est analogue à ceux que font naître deux roues tournant avec rapidité l'une derrière l'autre, dans des plans parallèles et rapprochés, et avec des vitesses inégales de grandeur ou de direction.

M. Matteucci a remarqué tout récemment que, pour faire mieux ressortir les belles observations de Savart sur la constitution de la veine liquide, il suffisait d'éclairer la veine avec une grosse étincelle électrique, ou mieux avec une série d'étincelles. En examinant ainsi la veine fluide, telle que Savart l'obtient, tout le monde peut voir facilement que la partie qui, à l'œil, semble continue, est réellement composée de gouttes ayant exactement la forme assignée par l'illustre physicien : on voit des gouttes allongées, d'autres aplaties, d'autres presque sphériques.

M. Plateau a proposé un procédé général différent de celui de M. Wheatstone, pour montrer sous leur forme réelle les objets aux-

quels leur mouvement rapide donne une apparence trompeuse. Son appareil consiste en un disque de carton noirci, d'environ 25 centimètres de diamètre, mobile autour d'un axe, comme une roue, et percé vers sa circonférence d'une vingtaine de petites fentes dirigées dans le sens des rayons. Ces ouvertures peuvent avoir environ 2 millimètres de largeur et 2 centimètres de longueur, et doivent être percées à des distances égales l'une de l'autre. Pour faire usage de cet instrument, il faut donner au disque un mouvement de rotation suffisamment rapide, fermer un œil, et regarder de l'autre, à travers la bande circulaire transparente qui résulte du mouvement des fentes, l'objet mobile dont on veut distinguer la forme véritable ; seulement, il faut avoir soin de tenir l'œil le plus près possible des fentes, et se placer à une certaine distance de l'objet.

Supposons d'abord que l'objet ait un mouvement périodique, c'est-à-dire qu'il repasse successivement par les mêmes positions ; que ce soit, par exemple, une corde en vibration, un charbon ardent mû circulairement, etc. ; ou bien que des objets semblables viennent successivement occuper la même place, tels que les rayons ou les dents d'une roue, les différentes fusées d'un soleil d'artifice, etc. ; alors, si la vitesse de notre disque est telle que chaque fois qu'une fente passe devant l'œil, le même objet ou des objets semblables se retrouvent dans la même position par rapport à celui-ci, on conçoit qu'il doit se former sur la rétine une suite d'impressions identiques que leur persistance liera entre elles, et d'où résultera l'apparence continue d'un objet ou d'une suite d'objets immobiles, ayant, ou à très peu près, la forme réelle des objets que l'on observe. Ainsi, par exemple, une roue qui tournerait assez rapidement pour que ses rayons ou ses dents parussent se confondre, semblerait parfaitement immobile à travers notre disque, en supposant à celui-ci une vitesse convenable. Si le mouvement de l'objet à observer ne présente pas de succession régulière, comme serait un de ces météores lumineux dont la trace brillante est probablement due à la persistance de l'impression, alors encore l'instrument peut être utile. Dans ce cas, l'objet ne peut être isolé, par rapport à l'œil, dans une suite de positions identiques ; mais les images qu'il produira sur la rétine, dans les positions différentes qui correspondent aux passages successifs des

fentes, persisteront assez longtemps pour qu'on puisse, en général, juger de sa forme réelle.

Nous rapporterons ici, comme application, l'effet que présente, dans certaines circonstances, la flamme d'une chandelle soumise à ce genre d'observation. On sait qu'une flamme semblable paraît prendre, de temps à autre, un mouvement oscillatoire rapide dans le sens de sa longueur; on dirait alors que le sommet s'abaisse et s'élève alternativement. Si, dans un moment d'agitation, on observe cette flamme à l'aide du disque en question, on voit la partie supérieure partagée en plusieurs portions distinctes, placées les unes au-dessus des autres et séparées par des intervalles noirs. Il faut conclure de là que le mouvement oscillatoire apparent de la flamme est dû à ce que, dans ces circonstances, elle lance de son sommet une suite de flammes partielles et séparées qui s'élèvent rapidement et s'éteignent l'une après l'autre.

Thraumatrope. — Le phénomène que nous étudions ici est encore le principe de plusieurs illusions curieuses. Tout le monde connaît le *thraumatrope*, ce petit instrument qui consiste en un carton circulaire que l'on fait mouvoir rapidement autour d'un de ses diamètres, et qui porte sur chacune de ses faces des dessins tels que la combinaison des deux impressions qu'ils produisent sur la rétine forme un troisième dessin régulier.

Anorthoscope. — M. Plateau s'est servi de la persistance des impressions pour produire un nouveau genre d'anamorphoses, en faisant tourner rapidement l'un derrière l'autre, avec des vitesses dans un rapport déterminé, deux disques, dont l'un, celui de derrière, porte une figure déformée vivement éclairée, et dont l'autre est percé d'une fente étroite. Il a fait voir comment on pouvait faire naître ainsi, de figures très difformes, des images régulières quelconques qui semblent parfaitement immobiles. La figure régulière ainsi produite résulte des intersections apparentes successives de la fente avec les différentes parties de la figure difforme, intersections que la persistance des impressions fait paraître simultanées. Cette application a donné naissance à un curieux appareil connu sous le nom d'*anorthoscope*.

Expériences de M. Faraday. — M. Faraday a publié une note sur certaines illusions consistant principalement dans les apparences



régulières que présentent deux roues, de même grandeur et d'un même nombre de rayons, placées l'une derrière l'autre, et tournant rapidement sur un axe commun dans des plans très rapprochés, avec des vitesses égales et en sens contraire. L'œil placé devant un pareil système, dans la direction de l'axe, verra l'apparence d'une roue parfaitement immobile et dont les rayons seront en nombre double de chacune des deux roues en mouvement.

Une autre expérience propre à M. Faraday consiste à faire tourner en face d'un miroir, à la distance de 4 à 5 mètres de celui-ci, une roue de carton dentée, et à regarder dans la glace l'image de cette roue à travers l'espèce de gaz produite par le mouvement des dents et des intervalles, l'œil étant supposé très près de la roue. L'image paraît alors complètement immobile et dans sa forme réelle, comme si le mouvement de la roue cessait d'avoir lieu. M. Faraday a fait voir, de plus, que si l'on partage en secteurs colorés et convenablement disposés la partie de la roue comprise entre les dents et le centre; les couleurs, qui se mêlent lorsqu'on regarde directement la roue en mouvement, se séparent immédiatement si l'on observe de la manière indiquée son image dans le miroir. Il serait facile de déduire des principes que nous avons déjà établis la raison des effets que nous venons de décrire. On expliquerait de la même manière l'expérience suivante, due encore à M. Faraday. Si l'on découpe dans la roue, entre les dents et le centre, une nouvelle rangée d'ouvertures dont le nombre diffère un peu de celui des dents, et si alors on soumet cette roue à l'expérience du miroir, en regardant à travers l'une ou l'autre rangée d'ouvertures, l'image de celle à travers laquelle on regarde paraît animée d'un mouvement lent de rotation. On peut ainsi percer plusieurs rangs d'ouvertures, de manière à produire l'apparence de mouvements plus ou moins rapides et de sens différents.

Fantascope, phénakisticope. — Les expériences que nous venons de rappeler ont conduit M. Plateau à réaliser un nouveau genre d'illusions, qui consiste à faire paraître animées et vivantes des figures dessinées. Ce nouvel instrument a reçu le nom de *fantascope* et produit des apparences véritablement singulières. La même idée, mise depuis à exécution d'une manière beaucoup plus imparfaite, a donné naissance au *phénakisticope*. Ce dernier appareil consiste essentielle-

ment en un disque de carton percé vers la circonférence d'une série d'ouvertures étroites, et sur lequel sont peintes de petites figures qui, lorsqu'on fait tourner le disque vis-à-vis d'un miroir, en regardant d'un œil son image à travers les ouvertures, semblent s'animer et exécuter différents mouvements. L'effet provient d'une disposition telle de l'instrument, que des figures qui diffèrent graduellement entre elles de forme, de position ou de lieu, viennent successivement, et à des instants très rapprochés, se présenter à l'œil, de sorte que la persistance des impressions liant les images entre elles, l'œil croit voir les mêmes figures passant d'une manière continue d'un état à l'autre.

Revenons maintenant aux couleurs subjectives, en prenant encore pour guide l'excellente dissertation de M. Plateau.

Couleurs subjectives. 1re classe : *Succédanées.* — Si l'on regarde fixement un objet coloré placé sur un fond noir, en tenant l'œil constamment attaché sur le même point, on voit, au bout de quelque temps, la couleur de cet objet perdre peu à peu de son éclat ; et si alors on porte subitement les yeux sur une surface blanche, on voit bientôt paraître une image de même forme que l'objet, mais d'une couleur complémentaire de ce dernier : on désigne, comme on sait, sous le nom de *complémentaires*, deux couleurs qui, ajoutées ou mêlées ensemble, reproduisent du blanc. Ainsi, la contemplation prolongée d'un objet *rouge* donne ensuite naissance à une image *verte*, et réciproquement ; la contemplation prolongée d'un objet *vert* est suivie de l'apparition d'une image *rouge ;* si l'objet est *jaune* ou *bleu*, l'image subséquente sera *violette* ou *orangée*, et *vice versâ*. De plus, un objet *blanc* produit de cette manière une image noirâtre, tandis que l'objet *noir* produit une image blanche plus claire que le fond sur lequel elle se dessine. Toutes ces images restent visibles pendant un temps assez long ; leur intensité, ainsi que leur durée, est d'autant plus grande qu'on a regardé l'objet pendant un temps plus considérable. Ces apparences forment une partie de celles auxquelles on donne le nom de *couleurs accidentelles*, nom donné par Buffon, à qui l'on doit, après Jurin, les premières observations sur ce genre de phénomènes. Le temps, comme on voit, entre essentiellement dans ce premier ordre de couleurs subjectives, puisqu'il est de leur nature de *succéder* aux couleurs objectives qui les ont fait naître.

Propriétés de ce premier ordre de couleurs subjectives. — Voici les propriétés principales que présentent ces apparences singulières :

1° La disparition des images n'a pas lieu, en général, par un décroissement d'intensité graduel et continu : elles présentent, au contraire, des disparitions et réapparitions alternatives ; quelquefois même on voit reparaître une ou plusieurs fois l'impression primitive. L'expérience suivante de M. Plateau a montré cet effet d'une manière extrêmement remarquable. L'un de ses yeux étant fermé et couvert avec un mouchoir, il adaptait à l'autre un tube noirci d'environ cinquante centimètres de longueur et trois de largeur, et il regardait fixement, pendant une minute au moins, un papier rouge bien éclairé et suffisamment étendu pour que les bords en fussent cachés par le tube ; puis, sans découvrir l'œil fermé, il enlevait subitement le tube, en regardant le plafond de l'appartement ; alors il voyait se former d'abord une image circulaire verte ; mais bientôt elle était remplacée par une image rouge d'une faible intensité ; après quoi reparaissait l'image verte, à laquelle succédait de nouveau une image rougeâtre, et ainsi de suite ; l'image rouge reparaissait ainsi jusqu'à quatre fois, l'intensité du rouge et du vert allant toujours en s'affaiblissant.

2° Ces mêmes phénomènes se manifestent encore, lorsqu'au lieu de porter les yeux sur une surface blanche, après avoir regardé l'objet pendant un temps suffisant, on les ferme au contraire tout de suite, mais en les couvrant complètement d'un mouchoir sur lequel on applique les mains : on voit parfaitement, dans cette obscurité complète, se dessiner l'image de l'objet, colorée de la teinte complémentaire.

3° L'image accidentelle paraît plus ou moins grande, selon la distance de la surface sur laquelle on la projette : lorsque cette surface est à la même distance de l'œil que l'objet, l'image se montre de la même grandeur ; si la surface est plus ou moins éloignée, l'image paraît augmenter ou diminuer proportionnellement.

4° Les couleurs subjectives se combinent entre elles à la manière des couleurs réelles, c'est-à-dire que du jaune et du bleu accidentels forment du vert ; du rouge et du bleu accidentels forment du violet. On peut s'en convaincre par l'expérience suivante, due au P. Scherffer. On place l'un à côté de l'autre, sur un fond noir, deux

petits carrés de papiers colorés, l'un violet et l'autre orangé, couleurs dont les accidentelles sont le jaune et le bleu, et l'on marque d'un point noir le milieu de chacun de ces carrés. Alors, on porte alternativement les yeux sur l'un et l'autre point, en les tenant fixés sur chacun d'eux pendant environ une seconde; et après avoir répété cette opération un grand nombre de fois, on ferme les yeux ou on les dirige vers une surface blanche. Alors, on distingue bientôt l'apparence de trois carrés juxtaposés dont la formation est aisée à concevoir; le carré du milieu étant évidemment formé de la superposition des couleurs accidentelles produites par les deux couleurs employées; et, dans le cas dont il s'agit, le carré du milieu est *vert*: il serait *violet*, si les deux couleurs employées étaient le vert et l'orangé, dont les accidentelles sont le rouge ou le bleu, etc. Un cas fait cependant exception; c'est celui ou les deux couleurs accidentelles que l'on combine sont complémentaires l'une de l'autre : alors, au lieu de produire du blanc, comme deux couleurs réelles complémentaires, elles semblent, au contraire, ne donner lieu qu'à un effet d'obscurité. Ainsi, lorsque les deux petits carrés de papier sont l'un *vert* et l'autre *rouge*, couleurs dont les accidentelles sont le *rouge* et le *vert*, le carré qui occupe le milieu dans l'image accidentelle paraît noirâtre, si on le projette sur un fond blanc; et complètement noir, si l'on se couvre les yeux.

5° Les couleurs subjectives accidentelles se combinent avec les couleurs réelles de la même manière que ces dernières entre elles, c'est-à dire que du *rouge accidentel* et du *bleu réel* forment du *violet*, que du bleu accidentel et du jaune réel font du vert. Il est aisé de s'assurer du fait, en projetant l'image accidentelle sur une surface peinte de la couleur avec laquelle on veut la combiner; ainsi, en projetant sur une feuille de papier *bleu* l'image accidentelle *rouge* provenant d'un objet vert, il en résulte une apparence d'un beau violet. Seulement, il faut tenir compte des remarques suivantes: l'objet étant toujours placé sur un fond noir, si l'on projette son image accidentelle sur une surface de même couleur que lui, ou, en d'autres termes, dont la couleur soit complémentaire de celle de l'image, celle-ci ne paraîtra plus que d'un gris foncé, comme si la sensation était en partie détruite en cet endroit de la surface. C'est ce qui arrivera, par exemple, si, après avoir regardé pendant quelque

temps un petit morceau de papier rouge posé sur un fond noir, on jette les yeux sur une feuille de ce même papier rouge.

Au contraire, si l'on projette l'image accidentelle sur une surface dont la couleur soit complémentaire de celle de l'objet, c'est-à-dire soit identique avec celle de l'image, celle-ci paraîtra d'une couleur plus belle et plus pure que le reste de la surface sur laquelle elle se détache. C'est ce qui aura lieu, par exemple, avec un objet *rouge* et une surface *verte*, avec un objet jaune et une surface violette.

6° Afin d'isoler de toute influence étrangère l'objet coloré qu'on regarde, nous avons admis jusqu'ici qu'il reposait sur un fond noir; si ce fond est blanc, on obtient des effets analogues quant à la couleur de l'image subjective, mais différents quant au rapport d'éclat de cette image et de la surface sur laquelle elle se détache. Ainsi, quand l'objet repose sur un fond noir, son image accidentelle, projetée sur une surface blanche, paraît plus sombre que celle-ci, et le contraire a lieu si l'objet repose sur un fond blanc.

Pour se former une idée complète des propriétés principales de ces couleurs subjectives, il faut encore ajouter les faits suivants :

7° Nous avons dit que lorsque l'on se recouvre les paupières après avoir regardé un objet assez éclatant, on voit ordinairement l'impression primitive persister pendant un temps assez considérable. En pareil cas, si l'on se découvre les paupières, ou si l'on ouvre les yeux en les dirigeant sur une surface blanche, il arrive généralement que cette impression primitive se change aussitôt en une image accidentelle, qui repasse de nouveau à l'état primitif si on se recouvre les yeux; et l'on peut ainsi faire passer successivement plusieurs fois l'impression par l'un ou l'autre état. L'effet se produit très bien avec l'image d'une fenêtre, et c'est ainsi que Francklin l'a observé : cette image, dans les yeux fermés et couverts, paraît formée de panneaux lumineux et de châssis obscurs; mais si l'on laisse la lumière arriver à l'œil, les panneaux deviennent obscurs et les châssis lumineux : si l'on ferme de nouveau les yeux, le premier effet reparaît, et ainsi de suite. Darwin a observé un effet analogue, après avoir regardé le soleil couchant. M. Brewster ajoute que si, après avoir regardé cet astre, on voit un spectre brun-rougeâtre, une certaine pression exercée sur l'œil fera changer cette image en un spectre vert, et que si l'on cesse la pression, l'image reprendra sa première couleur.

Remarquons en terminant que puisque l'impression primitive survit toujours pendant quelque temps à la cause qui l'a produite, l'image accidentelle ou subjective doit être regardée comme succédant réellement à l'image objective après un temps mesurable. Si, dans le plus grand nombre des expériences relatives aux couleurs subjectives, on ne peut saisir la trace de cette première impression qui s'efface, c'est qu'elle est généralement trop fugitive, et que le temps de son existence est encore diminué par cette circonstance que, pour donner beaucoup d'intensité et de durée à l'image accidentelle, on regarde l'objet pendant assez longtemps. En effet, tandis que la contemplation prolongée de l'objet accroît l'intensité et la durée du second phénomène, elle raccourcit, en général, comme nous l'avons vu, la durée du premier. Du reste, il est des cas dans lesquels la succession des deux phénomènes se montre parfaitement ; ainsi, lorsque M. Plateau contemplait la fenêtre pendant un temps ni trop long ni trop court, il voyait parfaitement, d'abord l'image de la fenêtre avec ses panneaux lumineux et ses châssis obscurs, puis l'image subjective avec les panneaux obscurs et les châssis lumineux, etc.

On peut, comme l'a indiqué Scherffer dans son si intéressant mémoire, faire servir ces phénomènes de vision à un amusement, de la manière suivante : on peint sur un fond noir un buste d'homme ou de femme, en employant des couleurs telles qu'elles aient pour accidentelles ou subjectives les couleurs naturelles d'une semblable figure. De cette manière la peau sera couleur de bronze, les sourcils et les cheveux seront blancs, les yeux auront des prunelles blanches sur un fond noir, etc., ce qui produira nécessairement un ensemble hideux ; mais si l'on regarde fixement pendant un temps suffisant un même point de cette figure, et qu'on jette ensuite les yeux sur un mur blanc, on y verra l'apparence d'une tête avec ses couleurs naturelles.

COULEURS SUBJECTIVES. 2e classe : *Couleurs subjectives simultanées.* — Toutes les apparences dont il a été question jusqu'ici *succèdent* à la contemplation des objets colorés ; mais l'expérience prouve que *pendant* cette contemplation même, il se manifeste un autre ordre de phénomènes consistant aussi dans l'apparition de couleurs complémentaires, et qui forment la seconde classe de couleurs subjectives ou

accidentelles. Ainsi, Buffon remarqua que pendant qu'on regarde fixement un objet coloré posé sur un fond blanc, il se manifeste extérieurement à cet objet et le long de son contour, une bordure colorée d'une teinte pareille à celle de l'image subjective que l'on obtient en jetant ensuite les yeux sur un autre endroit du fond blanc. Ici donc ce n'est pas dans le temps suivant, mais dans l'espace contigu que nait la couleur accidentelle. Quelques physiciens ont cependant rangé ce phénomène dans la classe précédente de couleurs subjectives, en l'attribuant à ce que, pendant la contemplation de l'objet, l'œil ne peut demeurer complètement immobile, de sorte que l'image vacille sur la rétine, et qu'il y a tout au tour de cette image des parties de la rétine qui, après avoir reçu l'impression de la lumière colorée venant du bord de l'objet, reçoivent l'impression du fond blanc. Mais sans parler de ce fait, il est une foule d'autres expériences qui montrent la production des couleurs accidentelles pendant la contemplation des objets colorés.

Citons d'abord les *ombres colorées*. Ainsi Rumford a montré que lorsqu'une ombre est produite dans une lumière colorée, cette ombre se teint de la couleur complémentaire ; c'est-à-dire, par exemple, que si l'on éclaire un papier avec de la lumière verte, un corps éclairé par une lumière blanche et interposé entre la lumière verte et le papier, produira sur ce dernier une ombre rouge.

Ainsi, encore d'après l'observation de Meusnier, lorsque l'intérieur d'un appartement n'est éclairé que par la lumière du soleil, transmis au travers d'un rideau d'étoffe colorée, et que ce rideau est percé d'un trou de quelques millimètres de diamètre, par lequel la lumière directe peut s'introduire, si l'on reçoit ce faisceau de lumière sur un papier blanc, la partie du papier éclairée par la lumière blanche du soleil paraît vivement colorée d'une teinte complémentaire de celle du rideau.

Prieur, de la Côte-d'Or, a fait voir que si l'on place entre la fenêtre et l'œil un morceau de papier coloré possédant une certaine transparence, et si l'on applique sur ce papier une petite bande de carton blanc, elle paraîtra teinte de la couleur complémentaire : on la verra *rose* sur un papier *vert*, couleur *lilas* sur un papier *jaune*, etc. L'effet est plus prononcé pour certaines positions du papier coloré, positions que l'on trouve aisément en faisant l'expérience ; de plus, si la petite bande de carton est elle-même colorée, sa couleur se

combine avec la complémentaire de celle du papier. Ainsi, une bande bleue paraîtra violette sur du papier vert, une bande jaune paraîtra verte sur du papier orangé, etc.

Citons encore une expérience du docteur Smith. Elle consiste à appliquer à l'un des yeux un petit tube de papier coloré transparent, que l'on éclaire fortement de côté. Alors, les deux yeux étant ouverts, on regarde une surface blanche, et la portion de cette surface vue à travers le tube coloré paraît teinte de la couleur complémentaire.

Effet de contraste. — Dans les expériences qui précèdent, l'espace dont la couleur paraît modifiée est supposé d'une petite étendue relativement à la surface colorée qui l'entoure, et la couleur de cette dernière ne paraît pas sensiblement altérée ; cependant M. Chevreul a prouvé d'une manière générale que cette modification des couleurs est réciproque ; c'est-à-dire que lorsque nous voyons simultanément deux objets colorés placés dans le voisinage l'un de l'autre, leurs deux couleurs semblent réagir simultanément, de telle manière *qu'à chacune d'entre elles s'ajoute la complémentaire de l'autre.* Ainsi, lorsque je place l'un à côté de l'autre un objet *rouge* et un objet *jaune*, le premier semblera tirer plus ou moins sur le *violet*, et le second sur le *vert.* Cette modification *réciproque* des deux couleurs est ordinairement trop faible pour qu'on puisse l'apercevoir sans avoir recours à un artifice particulier. Voici le procédé ingénieux de M. Chevreul : on colle l'une contre l'autre, sur une carte, deux bandes de papier ou d'étoffe teinte des deux couleurs que l'on veut soumettre à l'observation ; l'une est, par exemple, *rouge*, et l'autre *jaune* ; ces bandes ont 12 millimètres de largeur et 5 centimètres de longueur. Maintenant, on colle parallèlement à l'une de ces bandes, et à la distance d'un millimètre, une seconde bande qui lui soit identique en dimension et en couleur, et qui est destinée à servir de terme de comparaison ; on fait la même opération relativement à la bande peinte de l'autre couleur, et l'on a ainsi quatre bandes colorées, deux d'une couleur et deux de l'autre. Les deux intérieures se touchent, et il s'agit d'observer les modifications qu'elles se font mutuellement subir. Il suffit pour cela de regarder la carte dans un certain sens, et pendant quelques secondes. L'effet réciproque des deux couleurs contiguës, qui échapperait dans les circonstances ordinaires, de-

vient ainsi presque toujours sensible, à l'aide des bandes extrêmes de comparaison. Ainsi, dans l'exemple que nous avons choisi de bandes *rouges* et *jaunes*, on remarquera que la bande rouge intérieure tirera sur le *violet*, et que la bande jaune contiguë tirera sur le *vert*. M. Chevreul rapporte un grand nombre d'autres exemples qui rentrent tous dans la même loi ; il est seulement nécessaire de noter ici les faits suivants :

1° Si les deux couleurs employées sont complémentaires l'une de l'autre, comme le rouge et le vert, elles s'avivent par leur juxtaposition, elles acquièrent un éclat et une pureté des plus remarquables ;

2° Si l'on juxtapose une couleur quelconque avec le blanc, ce dernier se teint légèrement de la couleur complémentaire, et la couleur employée devient plus brillante et plus *foncée* ; ainsi, par le contact du blanc et du rouge, le premier deviendra verdâtre, le second semblera plus brillant et plus foncé ;

3° Si l'on juxtapose une couleur quelconque avec le noir, celui-ci prend également, d'une manière plus ou moins prononcée, la teinte complémentaire de la couleur employée, et cette dernière paraît, en général, plus brillante et plus *claire* ;

4° Le *blanc* et le *noir* éprouvent aussi, par leur juxtaposition, une modification réciproque : le premier devient plus éclatant, et le second plus foncé ;

5° Les modifications mutuelles des couleurs ne sont pas bornées au cas où les objets colorés qui se modifient sont contigus l'un à l'autre ; M. Chevreul prouve, par l'expérience, qu'on peut encore les rendre sensibles, même lorsque ces objets sont séparés de 5 centimètres ; seulement, l'intensité de l'effet est d'autant moindre que la distance est plus grande ;

6° A ces observations, tirées du mémoire de M. Chevreul, M. Plateau en ajoute une dernière, qui se vérifie à chaque instant et qui peut d'ailleurs, en quelque sorte, se déduire des 2°, 3° et 4° précédentes. C'est que lorsque deux objets voisins diffèrent en *clarté*, cette différence paraît, en général, augmentée par leur voisinage : l'un paraît plus clair et l'autre plus sombre que s'ils étaient vus séparément ou entourés d'objets d'une clarté égale à la leur. Il y a plus, c'est que des objets modérément éclairés peuvent disparaître complètement, comme cela résulte des observations de M. Brewster, lorsque

leur image se peint sur la rétine, dans le voisinage d'une partie de l'organe vivement excitée par la présence d'un objet brillant. On peut aisément se convaincre de ce fait, en regardant des objets placés à peu près derrière la flamme d'une bougie. Ces objets paraissent d'autant plus sombres que leur image est plus rapprochée de celle de la flamme, et lorsque la distance des deux images est très petite, ils disparaissent entièrement.

Afin de compléter l'exposé des faits principaux relatifs aux couleurs accidentelles, ajoutons aux expériences citées la suivante, qui est due au docteur Smith. Placez une bougie allumée très près de l'un de vos yeux, de l'œil droit, par exemple, mais en dehors de l'axe optique ; tenez alors en face des yeux une petite bande de papier blanc, et dirigez vos regards vers un point éloigné, de manière à voir la petite bande double, l'image vue par l'œil droit paraîtra verte, et celle qui est vue par l'œil gauche vous semblera rougeâtre.

Loi générale des couleurs subjectives simultanées. — En réfléchissant à l'ensemble des expériences que nous venons de rapporter, on verra qu'elles conduisent aux conclusions suivantes :

Lorsque nous regardons, directement ou indirectement, un espace coloré, il se manifeste, en dehors du contour de cet espace et jusqu'à une distance assez grande, l'apparence plus ou moins prononcée d'une couleur complémentaire de la sienne, couleur qui va en décroissant d'intensité à mesure que la distance augmente.

Le noir et le blanc, la clarté et l'obscurité, sont assimilés, dans ce cas, à deux couleurs complémentaires l'une de l'autre.

Si deux espaces ou objets colorés sont voisins l'un de l'autre, l'effet est alors réciproque, eu égard à l'étendue et à l'éclat de chacun des deux objets.

Ce développement de la couleur complémentaire est surtout prononcé lorsque l'espace sur lequel on l'observe est petit et entouré d'une étendue beaucoup plus considérable de la couleur qui doit produire cette couleur complémentaire, comme dans les expériences de Rumford, de Meusnier et de Prieur.

On augmente encore de beaucoup l'intensité de l'effet, en faisant en sorte que le petit espace soit peu éclairé par rapport au fond coloré sur lequel il se détache. Ce fait sert à rendre raison d'appa-

rences colorées qui se montrent dans un grand nombre de circonstances.

Ainsi, comme le remarque M. Brewster, lorsqu'un appartement dont les murs sont revêtus d'une couleur éclatante est éclairé par le soleil, les parties de l'ameublement sur lesquelles la lumière de cet astre ne tombe pas directement, semblent se teindre d'une couleur complémentaire de celle des murs.

Ainsi encore, d'après l'observation de M. Chevreul, lorsqu'on imprime des dessins sur des étoffes ou des papiers colorés, la couleur de ces dessins est ordinairement modifiée par la complémentaire de celle du fond. Il en est souvent résulté des discussions avec les imprimeurs, parce que les dessins ne paraissaient pas de la couleur qu'on avait demandée. Dans ce cas, on peut s'assurer aisément si la différence est due à un effet de couleurs subjectives ; il suffit pour cela de découper un morceau de papier blanc, de manière qu'il couvre le fond et ne laisse voir que le dessin.

On sait que les ombres produites sur un mur blanc, au lever ou au coucher du soleil, paraissent bleues ou vertes ; c'est qu'alors la lumière de cet astre est orangée ou rougeâtre, et que les ombres se teignent de la couleur complémentaire. Lorsqu'un appartement dans lequel on allume des bougies est encore faiblement éclairé par la lumière du jour qui s'éteint, les ombres que produisent les corps interposés entre les bougies et des objets blancs, paraissent également bleues par la même raison.

C'est encore de cette manière que M. Necker de Saussure a rendu raison des phénomènes remarquables que présente le sommet du Mont-Blanc au coucher du soleil.

M. Arago pense que l'on pourrait attribuer à la même cause la couleur bleue ou verte sous laquelle s'est montré le soleil à travers le brouillard extraordinaire de 1831, en admettant que les brouillards ou les nuages voisins du soleil aient été colorés de rouge par réflexion.

Il n'est personne qui n'ait observé que dans un lieu partiellement éclairé par le soleil, les parties qui sont dans l'ombre paraissent bien plus sombres que si le soleil venait à être caché par des nuages de manière que l'ombre s'étendît sur tous les objets. Au contraire, l'effet produit par les vitraux colorés des églises gothiques pro-

vient, en grande partie, de ce qu'ils sont environnés de murailles sombres.

Les faits relatifs à cette classe de couleur ont dû recevoir des applications nombreuses dans tous les arts où il s'agit d'assortir des couleurs. M. Chevreul en mentionne un grand nombre relatives à l'art du tapissier, à l'impression des dessins sur papier ou étoffe, etc. Par exemple, il remarque qu'il ne faut jamais assortir, pour les meubles, des étoffes d'un rouge éclatant avec l'acajou ; car la teinte complémentaire verdâtre qu'elles développent fait disparaître la couleur rougeâtre qui donne du prix à l'acajou, et celui-ci ressemble alors à du chêne ou du noyer, etc. M. Chevreul applique aussi ces considérations à l'arrangement des fleurs dans un parterre ; la règle principale à observer en pareil cas est de placer les fleurs bleues à côté des fleurs orangées, les fleurs violettes à côté des fleurs jaunes ; quant aux fleurs rouges et roses, elles ne se montrent jamais avec tant d'avantage que lorsqu'on les voit entourées de verdure et de fleurs blanches. Celles-ci doivent encore être interposées entre des groupes formés de fleurs bleues et orangées, de fleurs violettes et jaunes. On voit que cet arrangement est fondé sur ce que deux couleurs complémentaires s'avivent par leur voisinage, et que le blanc rehausse le ton des couleurs dont il est voisin. On peut encore faire des applications du même genre à la toilette des femmes : par exemple, pour un teint blanc, la coiffure qui semble devoir être la plus avantageuse sous ce rapport est un chapeau vert doublé de rose, parce que cette dernière couleur est réfléchie sur le visage, et que le vert qui l'entoure tend encore à ajouter à l'effet précédent celui de sa couleur complémentaire.

On a tiré également un parti excellent des effets qui résultent de la différence de clarté des objets voisins. Les peintres, pour bien juger de l'effet d'un tableau, le regardent à travers un tube noir : les couleurs acquièrent de cette manière une vivacité et un éclat considérables. L'effet magique du diorama dépend en partie de ce que le tableau est seul bien éclairé, tandis que tout ce qui l'entoure, ainsi que la salle où se trouvent les spectateurs, demeure dans une certaine obscurité. Enfin, quand on a besoin de produire un grand effet au théâtre, on a soin de diminuer autant que possible la lumière du lustre qui éclaire la salle.

Cette seconde classe de couleurs peut servir enfin à un amusement, de la manière suivante. On tend, sur un cadre rectangulaire de bois ou de carton, des papiers colorés ayant une certaine transparence, de telle manière que la moitié du rectangle présente un papier rouge et l'autre moitié un papier de couleur quelconque ; ensuite, on découpe en carton blanc une fleur dont toutes les parties aient peu de largeur, deux à trois millimètres au plus ; on peut, par exemple, découper à cet effet les pétales et les feuilles à jour. Enfin, on applique cette fleur sur les papiers colorés, de façon que la queue et les feuilles se détachent sur le papier rouge et que la fleur se détache sur l'autre papier coloré. Si alors on tient le cadre entre la fenêtre et l'œil dans une certaine position, la tige et les feuilles paraîtront vertes, et la fleur semblera colorée d'une teinte complémentaire de celle du fond. Si l'on a plusieurs cadres semblables présentant tous une moitié rouge et ayant l'autre moitié de couleur différente, la même fleur blanche, appliquée successivement sur les différents fonds, prendra chaque fois une nouvelle couleur ; elle sera bleue sur un fond orangé, rose sur un fond vert, tandis que les parties qui doivent être vertes demeureront de cette couleur.

Nature plus intime du phénomène des couleurs subjectives du second ordre. — Nous avons vu que les couleurs subjectives de la première classe sont quelquefois suivies d'une ou plusieurs réapparitions de l'impression primitive. Les couleurs que nous examinons maintenant présentent quelquefois un phénomène qui est, par rapport à l'espace, ce que le premier est pour le temps. On observe, dans quelques circonstances, qu'à une certaine distance du contour de l'espace coloré, la teinte complémentaire est remplacée par une légère nuance de la couleur même de cet espace. Ainsi, dans l'expérience de Prieur de la Côte-d'Or, lorsque la petite bande de carton blanc a une certaine largeur, dix ou douze millimètres, par exemple, il arrive, pour certaines positions du papier, que les bords seulement de celui-ci paraissent prendre la teinte complémentaire, et que l'intérieur se teint légèrement de la couleur même du papier : par exemple, sur un papier *rouge*, la petite bande aura les bords *verts* et l'intérieur *rose*, c'est-à-dire qu'à une certaine distance du contour de l'espace rouge, la teinte complémentaire verte est remplacée par une nuance de rouge.

Nous avons vu aussi que l'apparition des images de la première classe succède au phénomène de la persistance des impressions primitives. Eh bien! nous retrouvons encore, relativement aux couleurs accidentelles de la seconde classe, un fait qui est l'analogue de celui-là. En effet, les physiciens admettent que l'impression produite sur la rétine s'étend un peu au delà de l'espace directement excité par la lumière; de sorte que si l'on regarde un objet rouge, par exemple, sur un fond noir, l'image rouge perçue est un peu plus étendue qu'elle ne le serait si la sensation se bornait à l'espace que la lumière rouge frappe directement. Il résulte de là que si l'on considère les apparences qui se montrent extérieurement à l'espace coloré, à partir de son contour réel et en s'éloignant de ce contour, on doit admettre que l'impression de sa couleur s'étend jusqu'à une petite distance au delà de laquelle apparaît la teinte complémentaire : cette dernière elle-même, comme nous l'avons vu, est remplacée à une distance plus grande par un nouveau développement de la première couleur.

Conclusions. — *Résumé.* — Ainsi, en rapprochant les deux classes précédentes de couleurs subjectives, on voit :

Que, dans la première, aussitôt que la rétine cesse d'être excitée indirectement par la présence de l'objet coloré, il y a :

1° Persistance généralement très courte de l'impression primitive ;

2° Apparition de l'image accidentelle ;

3° Ordinairement disparitions et réapparitions successives plus ou moins nombreuses de cette image accidentelle; et, dans certains cas, apparitions alternatives de l'impression primitive et de l'image accidentelle.

Que, dans la seconde, si l'on s'éloigne du contour que présenterait l'espace ou objet coloré directement, on trouve :

1° A partir de ce contour, prolongement, jusqu'à une certaine distance, de l'impression réelle ;

2° Au delà de ce prolongement et jusqu'à une distance ordinairement considérable, développement de la couleur accidentelle ;

3° Dans certaines circonstances, au delà de l'espace coloré par la couleur accidentelle, espace qui est alors de peu de longueur, nouveau développement de la couleur réelle de l'objet.

On voit par là que les phénomènes de la deuxième classe sont réel-

lement, relativement à l'*espace*, ce que les phénomènes de la première sont relativement au *temps*. Il y a d'autres apparences qui dépendent à la fois de ces deux sortes de couleurs accidentelles.

Nouvelle classe de phénomènes. — Citons seulement quelques exemples : 1° lorsqu'au lieu de placer l'objet que l'on regarde sur un fond blanc ou noir, on le place sur un fond coloré et d'une étendue suffisante, la couleur de l'image que l'on aperçoit ensuite en jetant les yeux sur une surface blanche, n'est pas simplement la complémentaire de celle de l'objet : elle se trouve combinée avec la couleur du fond sur lequel il est posé. Du reste, ce fond lui-même produit la couleur complémentaire, et c'est sur elle que se détache l'image de l'objet. Ainsi, un petit morceau de papier *orangé* placé sur une feuille de papier *jaune*, produira une image accidentelle *verte* sur un fond *violet ;* c'est-à-dire que l'image se composera du *bleu*, qui est la complémentaire de l'*orangé*, et du *jaune*, qui est la couleur même du papier sur lequel l'objet était placé. De même, un petit morceau de papier *violet* placé sur une feuille de papier *rouge* produira une image *orangée* sur un fond *vert* : ces effets ont été remarqués par Darwin.

Ces phénomènes dépendent des deux classes de couleurs subjectives que nous avons étudiées. En effet, pendant que l'on regarde un objet *orangé* placé sur un fond *jaune*, à cet orangé doit se mêler une légère teinte de *violet* produite par le voisinage du *jaune ;* et lorsqu'ensuite l'on porte les yeux sur une surface *blanche*, les phénomènes de succession se manifestant, l'*orangé* se change en *bleu*, et le *violet* qui s'y était mêlé se change également en sa complémentaire, c'est-à-dire en *jaune ;* l'image doit donc paraître composée de *jaune* et de *bleu*, ou *verte*.

2° Lorsque l'objet que l'on regarde est *noir* et placé sur un fond coloré, son image accidentelle paraît toujours se teindre de la couleur de ce fond. Ainsi, un objet *noir* placé sur un fond *rouge* donnera une image accidentelle *rouge pâle* sur un fond *vert*, etc. L'effet est plus prononcé dans les yeux fermés et couverts. Ici encore, pendant qu'on regardait l'objet noir, il s'y manifestait une teinte légère complémentaire de la couleur du fond, teinte qui, lorsqu'on cesse de regarder l'objet, se change en sa complémentaire, c'est-à-dire en la couleur même du fond.

3° Si, au contraire, on regarde fixement et assez longtemps un petit objet coloré sur un fond noir d'une étendue suffisante, et qu'ensuite on couvre les yeux, l'image accidentelle paraît entourée, jusqu'à une certaine distance, d'une auréole légèrement teinte de la couleur même de l'objet. Ainsi, un objet *rouge* produit une image *verte* entourée d'une auréole *rougeâtre ;* effet qui provient évidemment de ce que, pendant la contemplation de l'objet coloré, l'espace qui l'entoure prend, jusqu'à une certaine distance, une teinte légère complémentaire de la couleur de l'objet, et que cette teinte se change ensuite, dans les yeux fermés et couverts, en sa complémentaire, c'est-à-dire en la couleur même de l'objet.

On comprend encore sous le nom de couleurs subjectives des apparences colorées produites dans des circonstances entièrement différentes : par exemple, lorsqu'on se presse l'œil dans l'obscurité, ou lorsqu'on reçoit un choc sur l'œil, ou bien encore dans certaines indispositions de l'estomac, etc. Nous en dirons quelques mots plus tard.

HYPOTHÈSES DIVERSES IMAGINÉES POUR L'EXPLICATION DE CES SINGULIERS PHÉNOMÈNES. — *Couleurs de la 1re classe : Théorie de Scherffer.*—La théorie dont la première idée est due à Scherffer semble adoptée maintenant, avec une légère simplification, par la généralité des physiciens. Elle consiste à supposer que l'action soutenue des rayons d'une certaine couleur sur une partie de la rétine en diminue momentanément la sensibilité pour les rayons de cette couleur, de sorte que si l'on porte les yeux sur une surface blanche, la portion de la rétine dont la sensibilité est ainsi modifiée ne pourra, pendant quelque temps, percevoir d'impression complète que de la partie de ce blanc complémentaire de la couleur qui a fatigué l'organe. Ainsi, dans cette hypothèse, lorsqu'on regarde fixement et assez longtemps un objet *rouge*, la partie de la rétine où se peint l'image de l'objet devient moins sensible à la lumière *rouge ;* et si l'on porte alors les yeux sur une surface blanche, ce blanc pouvant être considéré comme composé de *rouge* et de *vert*, on devra voir une image dans laquelle prédominera le *vert.* Cette théorie simple et ingénieuse explique complètement la plupart des phénomènes relatifs aux couleurs subjectives de la première classe ; la diminution d'éclat de l'objet coloré, à mesure que la contemplation se prolonge ; l'accroissement d'intensité

de l'image, quand on a regardé l'objet plus longtemps; la combinaison des couleurs accidentelles entre elles, etc., etc. Il est cependant des faits importants pour l'explication desquels cette théorie est évidemment insuffisante; tels sont, par exemple : 1° la production des couleurs subjectives dans l'obscurité la plus complète; comment la simple insensibilité de l'organe pour une couleur produirait-elle, en l'absence de toute lumière, la sensation de la couleur complémentaire? 2° La combinaison des couleurs accidentelles avec les couleurs réelles; si une image accidentelle *rouge* provient de ce que la rétine est devenue moins sensible au *vert*, comment se fait-il que l'on voie du *violet* lorsqu'on projette cette image sur une surface *bleue?* Après avoir regardé fixement un petit cercle de papier placé dans le rayon *rouge*, et avoir porté les yeux sur un cercle plus grand éclairé par le rayon *jaune*, M. Plateau a vu parfaitement sur celui-ci une image d'un beau *vert jaunâtre*, tandis que si la rétine était simplement devenue insensible au rouge, il n'aurait évidemment pu apercevoir qu'une image *noirâtre;* 3° la marche en apparence irrégulière de décroissement que présentent les images accidentelles; le fait suivant suffirait, ce semble, à la renverser de fond en comble : lorsque après s'être pressé les yeux d'une manière particulière, M. Plateau faisait cesser brusquement la pression, il voyait, les yeux fermés et couverts, une grande tache *rouge* bordée de *vert;* mais aussitôt qu'il ouvrait les yeux ou qu'il les jetait sur une surface blanche, ces deux couleurs se changeaient en leurs complémentaires; la tache devenait *verte*, et le bord qui l'entourait devenait *rouge*. Ici, cependant, aucune lumière extérieure n'est venue fatiguer l'organe et le rendre moins sensible à certaines couleurs; ce sont des sensations spontanées de *rouge* et de *vert* qui se changent en sensations de *vert* et de *rouge*.

Couleurs de 2e classe : Théorie du contraste. — La théorie la plus généralement admise les attribue au *contraste*, c'est-à-dire à une cause morale qui fait ressortir ce que les couleurs mises en présence ont de *dissemblable*, en affaiblissant le sentiment de ce qu'elles ont de *commun;* ainsi, un petit objet *blanc* se détachant sur un fond coloré, sur un fond *rouge*, par exemple, l'effet du contraste diminue pour nous le sentiment de la partie *rouge* de ce *blanc* pour exalter, au contraire, celui de la partie complémentaire ou *verte*. Si l'on juxtapose un objet *vert*, par exemple, et un objet *violet*, le con-

traste affaiblira le sentiment de la couleur *bleue* qui est commune à ces deux objets, et exaltera, au contraire, celui du *jaune* et du *rouge*, par lesquels ils diffèrent; le premier de ces deux objets paraîtra donc plus *jaune* et le second plus *rouge*, ce qui est d'accord avec la loi trouvée par M. Chevreul. Enfin, si les objets mis en présence diffèrent en clarté, le contraste exaltera également cette différence; de là, par exemple, l'effet du noir et du blanc mis en présence, etc.

Sans nier complètement l'influence du contraste, M. Plateau croit cependant que cette cause, qui peut les accroître ou même les produire dans certains cas, n'est pas celle à laquelle il faut attribuer l'ensemble des phénomènes subjectifs de la seconde classe. Voici les motifs de son opinion: 1° comment admettre qu'une cause morale puisse aller jusqu'à créer, dans une obscurité complète, une sensation de lumière purement imaginaire, comme celle des auréoles (p 585, 3°)? 2° dans les expériences de M. Chevreul, l'effet se montrant tout aussi bien quand les deux couleurs juxtaposées n'avaient pas de partie commune, le contraste alors est plus difficile à expliquer.

Plusieurs physiciens, entre autres Young, ont essayé d'étendre à cette seconde classe de couleurs l'hypothèse d'une modification dans la sensibilité de la rétine, en admettant que lorsqu'une portion de la rétine est soumise à l'action d'une couleur quelconque, les parties environnantes perdent de leur sensibilité pour cette même couleur. Cette théorie attribue donc les phénomènes à une cause physique; mais elle est complètement insuffisante. Que deviendraient alors, en effet, les phénomènes de couleurs accidentelles produits dans l'obscurité? Comment expliquerait-on la manifestation, dans certains cas, d'une teinte identique à celle de l'objet coloré à une certaine distance du contour de cet objet? etc.

Théorie de M. Plateau. — Il faut d'abord remarquer avec Scherffer qu'il résulte du changement apparent de grandeur des images accidentelles, lorsqu'on les projette sur des surfaces plus ou moins distantes, que ces images sont dues à une modification physique de l'organe. Tel doit être, en effet, le phénomène produit, si l'on admet qu'une portion déterminée de la rétine éprouve une modification quelconque; car l'image résultante correspondant à un angle visuel constant, nous devons la croire d'autant plus grande que nous

la rapportons à une plus grande distance. On ne voit, au contraire, aucune raison pour qu'il en soit ainsi dans l'hypothèse d'une cause morale; l'image devrait alors nous paraître toujours de la même grandeur que l'objet. L'analogie, d'ailleurs, doit nous porter à regarder les couleurs de la seconde classe comme dues, ainsi que les premières, à une modification physique de l'organe.

Si, maintenant, nous comparons les impressions accidentelles aux impressions réelles correspondantes, nous verrons bientôt que les premières doivent être regardées comme d'une nature *opposée* à celle des secondes : 1° l'opposition est évidente pour le cas d'un objet blanc sur un fond noir; 2° on peut dire, en général, que deux couleurs complémentaires sont opposées, puisque leurs teintes se neutralisent en produisant du blanc; mais, comme on l'a vu, l'opposition va plus loin dans le cas d'une impression réelle et de l'impression accidentelle correspondante; elle détruit alors le sentiment de la clarté en produisant du *noir;* 3° tandis que deux couleurs réelles complémentaires produisent du *blanc* par leur combinaison, deux couleurs complémentaires accidentelles produisent, au contraire, du *noir.*

Ce qui précède étant admis, reprenons l'ensemble des phénomènes qui succèdent à la contemplation des objets colorés, ou qui accompagnent cette contemplation. Lorsqu'une portion de la rétine, après avoir été excitée par la présence d'un objet coloré, est subitement soustraite à cette action, elle regagne peu à peu l'état normal, en produisant pour nous les phénomènes de la persistance de l'impression primitive et des couleurs accidentelles de la première classe.

D'un autre côté, si, tandis que la rétine est soumise à l'action de la lumière colorée, nous examinons les parties de l'organe qui environnent l'espace directement excité, nous voyons que l'on ne retrouve l'état normal qu'à une distance plus ou moins grande du contour de cet espace, et que l'on arrive à cet état normal en passant par les effets de l'irradiation et des couleurs accidentelles de seconde classe.

Ainsi, d'une part, la *persistance de l'impression primitive et les couleurs accidentelles de la première classe* constituent le passage de l'état d'excitation d'une portion de la rétine à l'état normal, lorsqu'on envisage ce passage *selon le temps;*

D'une autre part, l'*irradiation et les couleurs accidentelles de la seconde classe* constituent le passage de l'état d'excitation de cette

même portion de la rétine à l'état normal, lorsqu'on envisage ce passage selon l'espace.

Tous les phénomènes dont nous nous sommes occupés doivent donc se rattacher à un même principe. M. Plateau a, de plus, fait voir qu'ils se lient entre eux de la manière la plus naturelle, qu'ils sont de simples conséquences de la loi de continuité.

En effet, examinons de plus près le passage à l'état normal selon le temps : lorsque la rétine est subitement soustraite à l'action des rayons émanés de l'objet coloré, l'état d'excitation de l'organe persévère d'abord pendant quelque temps en s'affaiblissant, mais *sans changer de nature*, et de là résulte la persistance de l'impression primitive ; mais bientôt cet état de l'organe fait place à un état *opposé*, d'où résulte l'*image subjective* de l'objet. Cette nouvelle sensation atteint bientôt un maximum d'intensité, et s'affaiblit à son tour en présentant ordinairement une marche oscillatoire plus ou moins régulière, tantôt se bornant à disparaître et à reparaître successivement, tantôt alternant avec des réapparitions de l'impression primitive.

Or, comment ne pas voir une analogie frappante entre ces phénomènes et le mouvement d'un corps écarté d'une position d'équilibre stable, et qui y revient par un mouvement oscillatoire ? N'est-on pas naturellement conduit, par l'ensemble des phénomènes, à admettre que la rétine, écartée de son état normal par la présence d'un objet coloré, puis subitement abandonnée à elle-même, regagne d'abord rapidement le point de repos ; mais qu'entraînée par son mouvement, elle dépasse ce point pour atteindre un état opposé, et qu'ensuite elle tend de nouveau vers ce point de repos, qu'elle n'atteint, enfin, d'une manière durable, qu'après une suite d'oscillations décroissantes.

Si, maintenant, on examine au même point de vue le passage à l'état normal selon l'espace, on voit que l'état d'excitation causé par la lumière émanée de l'objet ne se borne pas à la portion de la rétine directement frappée par cette lumière, mais que cet état se prolonge sans changer de nature jusqu'à une petite distance du contour de cette portion, en produisant le phénomène de l'irradiation, que nous exposerons bientôt ; puis, au delà de cette limite se manifeste un état opposé de l'organe, d'où résulte la couleur accidentelle, et qu'enfin, dans certains cas, à une distance plus grande encore, se montre

semblent en rien aux autres couleurs accidentelles ; celles-ci sont, en général, très difficiles à apercevoir et très fugitives ; les ombres colorées, au contraire, sont vives, tranchées, persistantes, et l'esprit le plus convaincu se défend avec peine de l'idée qu'elles ne sont pas une illusion, une pure apparence subjective, mais bien des couleurs réelles. Voici ce qu'en disait le comte de Rumford, qui les produisait en recevant la lumière du jour par deux petites ouvertures faites à des distances suffisantes pour obtenir deux ombres distinctes d'un même corps opaque, et qu'il recouvrait de verres colorés. Les ombres, dit-il, étaient teintes par une variété infinie des couleurs les plus inattendues et souvent les plus belles ; elles changeaient continuellement, quelquefois avec une rapidité inconcevable ; les yeux étaient fascinés, et l'attention involontairement fixée sur ce tableau magique, également enchanteur et nouveau. Les nuages, charriés par le vent, semblaient apporter chacun à leur tour une succession infinie de couleurs diverses avec les teintes les plus harmonieuses.

Heureusement, à l'amateur transporté succéda le froid philosophe ; il veut résister au témoignage de ses yeux, il soupçonne que ces brillantes apparences sont trompeuses et qu'elles peuvent n'être qu'un effet de contraste entre des couleurs voisines ; il soumet donc ces charmantes illusions au contrôle de nouvelles expériences, et là une autre lumière, celle de la vérité, lui succède. Il place un ami dans la même position qu'il occupait, afin de s'assurer que ces brillants phénomènes n'ont pas cessé, et, lui limitant sa vue par le moyen d'un tube noirci en dedans, le place de manière à voir la seule ombre ; or, tandis que l'ami s'extasie sur sa vive couleur, le scrutateur sévère ne voit plus qu'une ombre obscure et sans couleur. La démonstration est rigoureuse et complète ; il ne sera plus nécessaire d'explorer, comme nous l'avions proposé, ces ombres colorées avec des plaques et des papiers sensibles pour s'assurer qu'elles ne produisent en aucune manière l'action indiquée par leur couleur.

Le mémoire de M. Fechner sur les couleurs subjectives, publié en 1840 dans les annales de Poggendorff, est le travail le plus récent sur cette matière délicate. Nous l'avons étudié avec un très grand soin, et si nous ne l'analysons pas avec quelque étendue, c'est qu'il nous a semblé qu'il contenait, il est vrai, des observations mieux faites et plus patiemment analysées, mais aucun fait véritablement nouveau.

En le lisant, nous sommes seulement resté persuadé que dans le phénomène des ombres colorées le contraste seul est en jeu et non pas l'irradiation, et que la dernière raison du problème doit se chercher dans un principe fondamental analogue à celui du mouvement relatif. Ce dernier principe consiste, comme on le sait, dans ce fait essentiel que le mouvement relatif de deux ou plusieurs mobiles ne dépend aucunement des forces ou des vitesses communes, mais uniquement des forces excédantes, c'est-à-dire des forces qui agissent sur les uns sans agir sur les autres. De même, dans la lumière, la sensation relative, celle perçue réellement par l'œil, ne dépend pas des teintes communes, mais des teintes excédantes ou différentielles. Ainsi, la portion d'un fond vert éclairée par un rayon blanc, ou la craie blanche, apparaît rouge, comme nous l'avons vu dans certaines circonstances. De même, si l'on a éclairé un fond blanc avec une lumière colorée, de l'orangé, par exemple, et que l'on fasse tomber de la lumière blanche sur une ombre projetée dans cette lumière colorée, le rayon orangé de cette lumière blanche ne sera pas sensible à l'œil, parce qu'il est commun au rayon et au fond; on ne percevra donc que la sensation réunie des autres rayons contenus dans le faisceau; ceux-ci produiront une teinte blanc verdâtre complémentaire de l'orangé, et dont l'ombre paraîtra revêtue.

Nous serions donc amené ainsi à distinguer trois ordres de couleurs subjectives : le premier aurait sa cause dans les vibrations successives de la rétine ; le second s'expliquerait par l'irradiation ou par le partage de la rétine en plusieurs portions vibrant simultanément sous l'impression d'une première excitation; le troisième trouverait sa raison dans le contraste ou l'élimination des couleurs communes aux deux rayons qui agissent à la fois sur l'organe de la vision.

Nous n'avons pas, au reste, la prétention de donner une solution définitive de ce difficile problème, et de prononcer en dernier ressort entre deux physiciens aussi distingués que MM. Plateau et Fechner. Divisés au point de vue théorique, ils se sont, hélas! rencontrés dans une infortune commune : tous deux, victimes des expériences homicides qu'ils avaient poursuivies avec une excessive ardeur, dans le but éminemment louable, mais téméraire, d'éclairer la nature des couleurs subjectives ou accidentelles, ils ont été frappés de cécité;

la Belgique et l'Allemagne ont eu trop longtemps à gémir sur la triste impuissance à laquelle cette cruelle infirmité réduisit ces deux nobles martyrs de la science. M. Fechner, heureusement, après quelques années de souffrance, a recouvré la vue comme par miracle. Quand son illustre rival partagera-t-il ses joies, comme il a partagé ses douleurs? Il nous a été donné d'assister, presque dans la ville de Leipzig, qu'il habite, à la résurrection de l'infatigable physicien allemand; puissions-nous aussi bientôt apprendre la nouvelle tant désirée de la guérison de l'auteur si ingénieux et si patient du magnifique mémoire sur l'irradiation, que nous analyserons bientôt pour faire mieux comprendre ce que nous avons dit des couleurs subjectives.

Recherches de M. Chevreul sur les lois du contraste simultané. — La dissertation qui précède renferme tout ce qu'il y a d'essentiel dans les savantes recherches de M. Chevreul; mais on nous accuserait avec raison d'injustice si nous ne résumions pas dans un article spécial les travaux si remarquables, au point de vue pratique, de notre célèbre compatriote; nous le ferons donc rapidement.

M. Chevreul a, le premier, nettement formulé cette loi générale : dans le cas où l'œil voit en même temps deux couleurs qui se touchent, il les voit le plus dissemblables possible : ces modifications mutuelles des couleurs ne sont pas bornées au cas où les zones colorées qui s'influencent sont contiguës l'une à l'autre, car on les aperçoit encore lorsque ces zones sont séparées. Il a établi nettement que toutes les fois que l'œil voit simultanément deux objets colorés, ce qu'il y a d'analogue dans la sensation des deux couleurs éprouve un tel affaiblissement, que ce qu'il y a de différent devient plus sensible dans l'impression simultanée de ces deux couleurs sur la rétine. La démonstration expérimentale de ces deux propositions distingue essentiellement ses observations de celles qui ont été faites auparavant. La loi de ces modifications une fois connue permet de prévoir les changements que deux couleurs données éprouveront par leur juxtaposition, lorsqu'on connaîtra les couleurs complémentaires de chacune d'elles et la hauteur de leurs tons, puisque les changements qu'elles éprouveront résulteront de ce que la complémentaire de l'une s'ajoutera à l'autre, et que si les deux couleurs ne sont pas à la même hauteur de tons, celle qui est foncée le paraîtra davantage, comme l'autre paraîtra plus claire qu'elle ne l'est, en supposant toutefois que

ce dernier effet ne soit pas détruit par le premier. Après l'étude attentive et complète de l'influence des couleurs, M. Chevreul pouvait aborder sans crainte les détails d'application. Il enseigne tour à tour l'art difficile d'assortir les fils colorés de manière à reproduire fidèlement les couleurs d'un tableau; de donner aux tableaux, aux tapisseries et aux tapis une perfection de coloris plus grande; d'imprimer des dessins sur des étoffes colorées ou sur des papiers peints, et des encres de couleurs sur des papiers colorés; d'assortir les étoffes au bois des meubles; de donner plus d'éclat aux vitraux colorés des grandes églises gothiques; de distribuer les fleurs dans les jardins; de mieux choisir et distribuer la couleur des vêtements; de juger enfin plus sainement des couleurs des étoffes teintes. Il donne la raison de ce fait universellement et très anciennement connu, qu'un assortiment de couleurs complémentaires n'est jamais désagréable, en rappelant qu'il résulte de ses expériences que ces couleurs s'embellissent par leur rapprochement en se renforçant et s'épurant l'une l'autre, quelle que soit d'ailleurs la différence entre les divers corps qu'on juxtapose; il prouve que si les couleurs non complémentaires qui se rapprochent davantage des sept couleurs primitives s'embellissent, en général, par leur juxtaposition, elles semblent cependant à l'œil s'être dénaturées plus ou moins; que plus les couleurs ont d'analogie, plus il y a de chances pour que leur juxtaposition mutuelle soit nuisible à l'une d'elles, ou même à toutes deux; que si la théorie ne peut prescrire, pour l'agrément de la vue, des arrangements de couleurs non complémentaires d'une manière aussi sûre qu'elle le fait lorsqu'il s'agit des couleurs complémentaires, cela tient à l'impossibilité de désigner aujourd'hui d'une manière précise ces innombrables couleurs des corps, faute de pouvoir les rapporter à des types invariables, comme le sont, par exemple, les anneaux colorés de Newton.

Échelle chromatique de M. Nobili. — Ces derniers mots de M. Chevreul nous rappellent un excellent mémoire du célèbre Nobili sur les couleurs en général, et en particulier sur une nouvelle échelle chromatique. Créateur de la métallochromie, ou de cet art merveilleux à l'aide duquel il obtenait sur des plaques d'acier des couleurs si brillantes, en faisant déposer à leur surface, au moyen de procédés électro-chimiques, des couches minces de diverses sub-

stances salines, d'acétate de plomb, par exemple ; et persuadé que la science n'entend jamais aussi bien son propre intérêt que lorsqu'elle vise à un but utile en s'associant aux arts, l'illustre physicien consacra de longues heures à la formation d'une échelle chromatique composée de quarante-quatre teintes disposées suivant l'ordre des couches ou lames très minces qui les forment. Cet ensemble produisait un effet impossible à décrire ; il était de la même nature que celui que produit sur l'oreille une échelle de demi-tons exécutée par un organe vocal parfait : on éprouvait un si grand plaisir à la vue de ces couleurs qui passaient graduellement d'un ton à l'autre, que l'œil qui s'en écartait y revenait bientôt, attiré par le désir de jouir encore de ce doux spectacle. Nobili essaya de faire reproduire son échelle à l'huile ou à l'aquarelle ; mais les copies les mieux exécutées ne donnaient qu'une idée très imparfaite des couleurs originales, et comme Nobili est mort, emportant avec lui non pas le secret de son art, mais cette adresse patiente, mais ces tours de main incommunicables qui pouvaient seuls procurer à coup sûr des teintes uniformes, la science et l'art auront à gémir longtemps encore peut-être sur l'abence d'une gamme de couleurs universellement adoptée.

Une anomalie singulière de l'échelle chromatique de Nobili attirait surtout l'attention : le vert se trouvait loin du bleu, entre le rouge et le jaune : les gens de l'art s'étonnaient de cette inversion ; quand on leur donnait les plus belles teintes vertes de la gamme, entraînés par l'habitude, ils la plaçaient parmi les jaunes et les bleus du second intervalle ; mais, à cette place, elles fatiguaient l'œil ; l'harmonie était détruite, et on ne la rétablissait qu'en revenant à l'ordre primitif. Mais en quoi consiste cette harmonie ? On la sent sans pouvoir la définir. Son caractère principal dans la nature, c'est le rapprochement de deux couleurs complémentaires ou telles, nous l'avons vu, que l'une donne naissance à l'autre. Venturi a dit avec raison : *Agréable et harmonieuse est surtout la réunion ou la succession de ces couleurs qui sont correspondantes entre elles, de manière que la sensation de l'une entraîne après elle la sensation fantastique de l'autre.* Ce n'est là, évidemment, qu'un des côtés de l'harmonie des couleurs, elle s'étend beaucoup plus loin ; mais, dans l'état actuel de la science, il serait impossible d'en donner une idée complète.

Nobili terminait son long mémoire par quelques remarques curieuses et utiles sur la clarté, la force, la beauté, la chaleur ou le froid, la gaieté ou la tristesse des couleurs. La couleur la plus claire est le jaune : une teinte claire résulte du mélange du peu de couleur et de beaucoup de lumière blanche, une teinte forte est le produit de beaucoup de couleur et de peu de lumière blanche ; l'orangé est la teinte la plus belle, le jaune est monotone ; le jaune et le rouge sont chauds, l'azur est froid ; le rouge et l'orangé sont gais, le violet et l'indigo sont tristes. Nobili essaie d'expliquer cette dernière différence par un rapprochement original entre les couleurs et les sons. Une exclamation, un cri de joie, sont composés de notes qui vont du grave à l'aigu ; une plainte, un accent de douleur, descendent de l'aigu au grave ; la même série de notes chantée en montant du grave à l'aigu, ou en descendant de l'aigu au grave, produit des effets contraires : de gaieté dans le premier cas, de tristesse dans le second. Or, si l'on prend les teintes complémentaires du rouge et du violet, qui sont le vert-azur et le jaune-vert, on verra qu'on passe, dans le premier cas, de vibrations plus longues à des vibrations plus brèves ; dans le second cas, c'est le contraire.

On nous pardonnera cette digression ; nous devions ce témoignage de bon souvenir au savant si distingué et si excellent qui daigna nous honorer de quelque amitié.

Effet singulier d'optique. — Avant d'arriver à l'irradiation, nous signalerons encore un effet singulier produit par la juxtaposition de certaines couleurs et observé par M. Wheatstone. Ce savant avait eu l'occasion de remarquer qu'un tapis formé d'un petit dessin vert et rouge présentait, lorsqu'il était éclairé par la lumière du gaz et qu'on le fixait attentivement, l'apparence d'un mouvement dans toutes les figures du dessin. On donna à cette illusion d'optique le nom *des cœurs agités*, parce qu'une des figures du dessin avait la forme d'un cœur. M. Wheatstone fit des essais sur plusieurs autres dessins formés d'autres couples de couleurs complémentaires, et s'assura que le mouvement était perceptible, mais jamais aussi nettement qu'avec les couleurs verte et rouge. Il ne put observer le phénomène qu'à la lueur du gaz ; mais M. Brewster vit plus tard qu'il se produisait aussi à la lumière solaire introduite par un petit trou dans la chambre obscure. Pour expliquer ce fait, M. Brewster part de

l'expérience qui montre qu'un objet fixe quelconque paraît se mouvoir quand la lumière qui l'éclaire change constamment de position et d'intensité. Cette expérience consiste à mouvoir une bougie devant une statue rapidement et dans toutes les directions : les clairs et les ombres, changeant sans cesse, produisent diverses apparences qui ressemblent aux mouvements des figures sur le tapis rouge et vert. Dans le cas du phénomène des cœurs agités, le mélange des deux couleurs complémentaires, qu'il soit regardé directement ou qu'il produise des impressions accidentelles, forme une succession d'ombres et de clairs qui font naître le mouvement apparent des figures. Lorsqu'on regarde fixement un des cœurs agités, il cesse presque entièrement de se mouvoir, tandis que les autres qui sont vus obliquement paraissent vibrer d'une manière très distincte : cet effet tient à ce que la sensibilité de la rétine augmente dans la vision oblique, à mesure que le point qui reçoit l'impression est plus éloigné de l'ouverture de la pupille.

IRRADIATION. — *Définition.* — L'irradiation proprement dite est le phénomène en vertu duquel un objet lumineux environné d'un espace obscur paraît plus ou moins amplifié. Cet empiétement apparent du bord d'un objet lumineux sur l'espace obscur qui l'entoure, entraîne une illusion opposée pour un objet obscur projeté sur un champ lumineux : les dimensions de cet objet paraissent diminuées, parce que l'irradiation produite le long de son contour par le champ lumineux environnant s'étend en dedans du contour.

Une divergence singulière d'opinion séparait les astronomes relativement à l'existence même de l'aberration ; les uns l'admettaient, les autres la révoquaient en doute : ces doutes dépendaient uniquement de ce que les astronomes n'avaient pas démêlé nettement le rôle que jouait l'irradiation oculaire dans l'observation faite à l'aide de lunettes.

Existence de l'irradiation. — Pour constater le phénomène, il suffit de jeter les yeux sur le croissant lumineux de la lune. Tout le monde sait, en effet, que lorsque la lune se montre sous la forme d'un croissant et laisse distinguer en même temps le reste de son disque faiblement éclairé par la lumière cendrée, le contour extérieur de la portion lumineuse semble présenter alors une forte saillie sur celui de la portion obscure ; en d'autres termes, le crois-

sant paraît faire partie d'un disque très sensiblement plus grand que celui auquel appartient le reste de l'astre. Si l'on veut une expérience décisive de nature à être répétée en tout temps, on peut s'y prendre de la manière suivante. Sur un carton noir rectangulaire, de 20 centimètres de hauteur et 15 de largeur, on laisse en blanc, sur la moitié supérieure, deux rectangles blancs, ou fenêtres, séparés par une bande noire d'un demi-centimètre de largeur ; cette bande prolongée en blanc divise en deux portions noires la moitié inférieure du carton. On a ainsi deux bandes de largeur égale, mais l'une blanche sur un fond noir, l'autre noire sur un fond blanc. Pour se servir de cet appareil, on le place verticalement près d'une fenêtre, de manière qu'il soit bien éclairé, et l'on s'en éloigne de 4 à 5 mètres. Alors la bande blanche paraît notablement plus large que la bande noire supérieure, et cette différence apparente augmente avec la distance. On conçoit que l'appareil est construit de manière à accroître l'effet résultant de l'irradiation ; car si, d'une part, la bande blanche augmente, en apparence, de largeur, la bande noire diminue, au contraire, par les irradiations des deux espaces blancs latéraux.

L'irradiation à l'œil nu doit donc être considérée comme l'un des faits de vision les mieux établis et les plus faciles à constater. Son intensité n'est pas la même dans les différents yeux, et varie aussi chez le même individu ; mais il n'est personne qui ne puisse l'observer d'une manière plus ou moins prononcée.

Dans les lunettes, il se complique ; son effet est diminué, l'erreur totale dépend à la fois du grossissement en lui-même, de l'éclat de l'image, de la nature ainsi que de la disposition de l'œil, et de la perfection de l'instrument ; qualités essentiellement variables. Quelquefois l'erreur sera insensible, quelquefois elle acquièrera une valeur considérable, au point de dissimuler le phénomène. Si, quand, pour mesurer l'irradiation, l'on employait des micromètres à double image, on n'a pas pu lui trouver de valeur sensible ; si même le micromètre à double image a fait disparaître une irradiation que le micromètre à fils décelait, cela tient à une cause révélée par les expériences qui ont démontré rigoureusement le principe général suivant : deux irradiations en regard et suffisamment rapprochées éprouvent l'une et l'autre une diminution. Cette diminution est d'autant plus considé-

rable que les bords des espaces lumineux d'où émanent les deux irradiations sont plus voisins.

De la cause de l'irradiation oculaire. — La théorie de l'irradiation universellement adoptée aujourd'hui consiste à admettre que l'impression produite au fond de l'œil par un objet lumineux se propage sur la rétine jusqu'à une petite distance tout autour de l'espace directement excité par la lumière, de sorte que la sensation totale correspond alors à une image un peu plus grande que la véritable. Le principe de continuité sur lequel se fonde cette théorie est si simple, que si l'existence de l'irradiation n'était pas connue, il semble qu'on devrait la prévoir *à priori*. En effet, supposons que l'on regarde fixement un objet lumineux ou éclairé se détachant sur un fond complètement noir. La lumière émanée de cet objet frappera une portion déterminée de la rétine, et le reste de l'organe ne sera soumis à aucune excitation directe. Mais est-il présumable que les parties de la rétine qui environnent immédiatement la portion directement excitée soient dans un repos parfait? On ne peut admettre qu'un état d'excitation énergique et l'état de repos absolu soient ainsi, sur le même organe, en contact immédiat. On est donc conduit *à priori* à penser qu'il doit se manifester autour de l'image de l'objet quelque apparence qui forme le passage graduel entre l'état d'excitation de la partie de l'organe soumise à l'action directe de la lumière, et l'état de repos des parties plus éloignées. Or, de quelque manière que se fasse ce passage, on doit regarder comme infiniment probable que l'excitation se propage jusqu'à une distance plus ou moins grande, sans changer de nature, autour de l'espace frappé par la lumière, et qu'ainsi il doit en résulter la sensation d'une image plus grande. L'irradiation serait donc, par rapport à l'espace, ce que le phénomène connu de la persistance des impressions de la rétine est relativement au temps. D'un côté, lorsque la rétine, après avoir été excitée pendant un certain temps par la lumière émanée d'un objet, est subitement soustraite à cette action, l'impression persiste encore pendant quelques instants. De l'autre côté, pendant que la rétine est soumise à l'action de la lumière émanée d'un objet, l'impression s'étendrait jusqu'à une petite distance autour de l'image de cet objet. L'un et l'autre phénomène seraient les résultats d'une simple loi de continuité, en vertu de laquelle,

lorsqu'une portion de l'organe est écartée de son état normal, l'état dynamique qui en résulte ne peut ni l'anéantir instantanément, ni demeurer immédiatement contigu à un état de repos parfait.

A ces considérations purement rationnelles, M. Plateau ajoute un grand nombre de faits ; nous en citerons seulement quelques uns :

1° On sait que le petit espace qui correspond sur la rétine à l'insertion du nerf optique, ce que l'on nomme le *punctum cæcum*, paraît insensible à l'action de la lumière directe ; ainsi, lorsqu'on place sur une surface noire un petit objet blanc ou coloré, et que, fermant l'un des yeux, on dirige l'autre de telle manière que l'image de cet objet tombe sur la portion de la rétine dont il s'agit, l'objet disparaît. Or, si, au lieu d'un objet coloré placé sur un fond noir, on emploie, au contraire, un objet noir sur une surface colorée, l'objet disparaît tout aussi bien, et la couleur de la surface s'étend sur l'endroit qu'il occupe. La partie la plus insensible de la rétine est donc impressionnée par communication ; en d'autres termes, l'impression environnante se propage latéralement sur ce petit espace ; il doit donc en être de même, à plus forte raison, des portions sensibles.

2° C'est un fait constant que l'irradiation augmente avec la durée de la contemplation de l'objet ; les physiciens, d'ailleurs, admettent que par la durée de la contemplation la rétine se laisse de moins en moins impressionner par la lumière directe ; si l'on rapproche ces deux faits, on en conclura qu'à mesure que la lumière directe semble perdre de son pouvoir sur la rétine, l'impression propagée s'y développe davantage.

3° On place sur un fond coloré une bande étroite de papier blanc, ou bien l'on trace une raie noire sur une surface blanche ; puis l'on tient l'œil fixé sur un autre point distant du petit objet de sept ou huit centimètres, de manière à ne voir ce dernier qu'indirectement. Au bout de quelques instants, si l'œil est bien immobile, l'objet disparaît complètement, et la couleur de la surface environnante paraît s'étendre sur la place qu'il occupe. La propagation latérale des impressions aux parties adjacentes de la rétine est donc à peu près démontrée.

En résumé, les considérations rationnelles, l'analogie et l'expérience appuient la théorie qui attribue l'irradiation à une propagation de l'impression. De plus, cette même théorie rend raison des lois diverses auxquelles le phénomène est soumis.

On en conclut d'abord que l'irradiation, phénomène de sensation, ne doit pas, comme cela a lieu en effet, être la même chez les différents individus, et que dans le même œil elle devra être tantôt plus, tantôt moins développée.

On comprend aussi, en second lieu, que l'irradiation doit paraître d'autant plus grande que l'objet lumineux est plus éloigné ; car, d'abord, la largeur absolue de la petite bande d'impression propagée qui entoure, sur la rétine, l'image de l'objet, ne peut dépendre de cet objet, pourvu que celui-ci conserve le même éclat et qu'il se détache toujours sur un fond également sombre : il suit de là que l'*angle visuel*, sous-tendu par cette même largeur, doit également demeurer constant, quelle que soit la distance ; or, comme l'observateur rapporte nécessairement l'apparence résultante à l'objet lui-même, il doit attribuer à la petite bande lumineuse qui lui semble ajoutée au contour de cet objet, une largeur absolue proportionnelle à la distance qui existe ou qu'il suppose exister entre son œil et ce dernier. En effet, si l'on imagine pour un instant que l'apparence soit une réalité, et qu'une petite bande semblable soit effectivement ajoutée au contour de l'objet, on ne pourrait évidemment la voir sous un angle visuel constant et indépendant de la distance, qu'en faisant varier sa largeur absolue proportionnellement à cette même distance. Si, maintenant, l'on pouvait démontrer que cet accroissement apparent correspond réellement à un angle visuel constant pour le même œil et le même objet, cette démonstration constituerait l'un des arguments les plus puissants que l'on pourrait apporter en faveur de la même théorie ; car cette constance de l'angle visuel est le caractère principal des phénomènes de vision qui dépendent d'une modification éprouvée par une portion de la rétine d'une étendue constante ; or, M. Plateau croit être parvenu à établir ce fait important à l'aide d'un appareil que nous décrirons dans la partie descriptive de cet ouvrage. Il est suffisamment démontré, par une longue série d'observations faites sur plusieurs personnes, que la valeur angulaire de l'irradiation est indépendante de la distance de l'objet à l'œil : et il en résulte, comme corollaire nécessaire, que la largeur absolue que nous attribuons à l'irradiation est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à la distance qui existe ou qui nous paraît exister entre l'objet et nous. L'irradiation n'avait été observée jusqu'ici, par les physiciens et les astronomes, que pour des objets éloignés ; or, on voit qu'elle existe

pour les petites comme pour les grandes distances : seulement, l'effet apparent diminuant proportionnellement à la distance, il nous frappe moins pour des objets rapprochés ; on peut accepter comme un principe avéré résultant des expériences de M. Plateau, que l'irradiation se manifeste à toutes les distances, depuis la plus courte distance de la division distincte jusqu'à un éloignement quelconque.

Il y avait encore une question importante à résoudre : il fallait déterminer la valeur très approchée de l'irradiation chez une même personne dans des circonstances différentes. M. Plateau l'a fait ; il s'est assuré que chez le même individu et pour un objet d'un même éclat, l'irradiation varie considérablement d'un jour à l'autre.

En troisième lieu, il est bien établi que l'irradiation croît avec l'éclat de l'objet, et l'hypothèse d'une propagation de l'impression sur la rétine rend encore parfaitement raison de ce fait : car on conçoit qu'une excitation plus énergique doit se propager plus loin. Mais l'observation démontre de plus que l'augmentation ne croît pas proportionnellement à l'éclat, que sa marche est beaucoup moins rapide. En effet, les diamètres angulaires du soleil et de la lune étant peu différents l'un de l'autre, l'éclat du disque solaire doit être à celui du disque de la lune à peu près dans le même rapport d'intensité que les lumières qui nous arrivent de ces deux astres ; or, l'éclat du disque solaire est près de mille fois celui du disque de la lune ; donc, si l'irradiation croissait proportionnellement à l'éclat de l'objet, celle que développe le soleil devrait être énorme relativement à celle de la lune, et le premier de ces astres présenterait à l'œil nu l'aspect d'un globe immense. L'aspect que nous présente en réalité le disque du soleil nous oblige donc d'admettre que l'irradiation augmente beaucoup moins rapidement que l'éclat de l'objet qui la produit. Il suit de là que si la loi qui lie ces deux quantités était figurée par une courbe ayant pour abscisses l'éclat, et pour ordonnées l'irradiation correspondante, cette courbe tournera sa concavité vers l'axe des abscisses ; et comme l'accroissement d'irradiation, d'abord très notable quand on part d'un éclat faible, finit par devenir insensible quand l'éclat atteint une certaine limite, la courbe en question aura une asymptote parallèle à l'axe des abscisses.

M. Plateau a cherché à vérifier ces conclusions par des expériences



directes, et à obtenir le tracé de la courbe dont il s'agit. Pour y parvenir, il n'y avait qu'une condition très difficile à remplir, c'était de pouvoir donner à l'objet une suite d'éclats déterminés et ayant entre eux des rapports connus. Il a atteint ce but d'une manière très simple, en profitant d'un principe de photométrie que nous examinerons bientôt, quand nous nous occuperons de la mesure des intensités de la lumière.

Il restait à apprécier l'influence qu'exerce sur l'irradiation le plus ou moins d'éclairement du champ qui environne l'objet lumineux. Comme la disposition de la rétine à recevoir les impressions propagées, en vertu des faits et des remarques que nous avons déjà développés, marche en sens inverse de la disposition du même organe à recevoir les impressions directes, il est permis de croire que lorsque la lumière agit directement sur une portion de la rétine, cette portion devient, par cela même, moins apte à recevoir une impression propagée. Dès lors on conçoit que si le fond sur lequel se détache l'objet lumineux envoie lui-même à l'œil une certaine quantité de lumière, l'impression directe qu'il produit contrarie l'irradiation du bord de l'objet, et cela d'autant plus que l'éclat de ce fond est plus considérable. Ceci étant admis, imaginons un objet qui se détache sur un fond non complètement privé de lumière, et supposons que l'on fasse croître graduellement l'éclairement de ce fond. L'irradiation produite le long du contour de l'objet va alors en diminuant, jusqu'à ce que l'éclat du champ soit devenu égal à celui de cet objet. Passé cette limite, si le premier continue à croître, il est évident qu'alors le champ produira à son tour une irradiation qui empiètera sur l'objet, et qui se développera, par conséquent, en sens inverse de la première, par rapport à la ligne qui borne le contour réel de cet objet. L'irradiation passera donc, pour ainsi dire, du positif au négatif. Ce passage, qui est une conséquence directe des faits connus, autorise à admettre qu'à l'instant où l'éclat du champ est devenu égal à celui de l'objet, l'irradiation de ce dernier est réduite à zéro; et comme l'effet doit être réciproque, si, au lieu d'un objet et d'un champ environnant, on suppose deux objets d'un éclat égal et qui se touchent, les irradiations de ces deux objets sont nulles au point ou à la ligne de contact. Nous avons déjà constaté ce résultat.

Pour mettre directement en évidence l'influence qu'exerce le plus

ou moins d'éclairement du champ, on peut recourir au moyen suivant. On commence par peindre en noir, sur la moitié de sa longueur, un morceau rectangulaire de papier blanc, qui se trouve ainsi divisé en deux rectangles, l'un complètement opaque, l'autre demi-transparent; il est convenable d'huiler cette dernière moitié, afin d'augmenter sa transparence. On découpe alors dans ce papier, avec la pointe d'un canif, une ouverture longitudinale de 5 millimètres de largeur, dont une moitié traverse l'espace noir et l'autre l'espace translucide. Enfin, on tend ce papier sur un cadre, ou, ce qui vaut mieux, on le colle sur une plaque de verre. Lorsque cet appareil est placé contre une fenêtre, on voit que l'ouverture longitudinale doit former une bande lumineuse dont une moitié se détache sur un fond noir, et l'autre sur un fond qui possède un certain éclat, quoique beaucoup moindre que celui de la bande. Or, si l'on se place à la distance de quelques mètres, on verra ces deux moitiés inégales en largeur, la première paraissant excéder notablement la seconde.

Il résulte de l'ensemble de cette discussion, que l'hypothèse d'une propagation de l'impression aux parties adjacentes de la rétine explique d'une manière satisfaisante toutes les lois de l'irradiation manifestée à l'œil nu. Malheureusement, ajoute M. Plateau, lorsque, pour observer ces effets de l'irradiation, l'on arme l'œil d'une lentille, il se présente un ordre de faits tout différents. Ainsi, tandis qu'un certain appareil observé à l'œil nu et à la distance de la vision distincte, manifestait une irradiation très apparente, l'image virtuelle du même appareil, produite par une forte loupe, située à la même distance et possédant d'ailleurs sensiblement le même éclat, se montre sans irradiation appréciable. On est donc conduit à cette conclusion singulière, que les loupes paraissent posséder la faculté de diminuer considérablement l'irradiation oculaire. Ne serait-ce pas parce que la lentille, en resserrant le faisceau lumineux sans modifier proportionnellement son éclat, lui fait occuper sur la rétine un plus petit espace? M. Plateau ne le dit pas, et n'essaie pas d'expliquer cette particularité. Avec une lentille convergente d'un foyer assez court, l'irradiation devenait trop petite pour être aperçue. Il est évident, d'après cela, que, dans les observations astronomiques, l'oculaire de la lunette doit exercer une action prononcée sur l'irradiation qui entoure l'image d'un astre.

M. Plateau a constaté que la modification apportée à l'irradiation

par l'addition d'une lentille paraît soumise aux lois suivantes : 1° l'irradiation est diminuée par les lentilles convergentes ; cet effet, considérable lorsque la distance focale est courte, s'affaiblit à mesure que cette distance augmente, devient nul quand celle-ci est infinie, et change de signe avec elle ; c'est-à-dire que l'irradiation s'accroît, au contraire, sous l'influence des lentilles divergentes; 2° les expériences semblent indiquer que l'action des lentilles ne dépend que de leur distance focale, et non des courbures absolues de leur surface.

M. Plateau termine ce magnifique travail, écrit avec une logique et une clarté de style incomparables, en présentant, sous forme de résumé, l'ensemble qui régit l'irradiation. Voici ses conclusions.

I. — IRRADIATION OCULAIRE.

1° L'irradiation est un fait bien établi, facile à constater, très variable, mais pouvant être mesuré avec précision dans chaque circonstance.

2° Elle se manifeste à toute distance de l'objet qui la produit, depuis la plus courte distance de la vision distincte jusqu'à un éloignement quelconque.

3° L'angle visuel qu'elle sous-tend et qui la mesure est indépendant de la distance de l'objet.

4° Il suit de là que la largeur absolue que nous lui attribuons est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à la distance qui existe ou qui nous paraît exister entre l'objet et nos yeux.

5° L'irradiation croît avec l'éclat de l'objet, mais suivant une loi beaucoup moins rapide. Si l'on figure cette loi par une courbe ayant pour abscisses les valeurs successives de l'éclat à partir de zéro, et pour ordonnées les valeurs correspondantes de l'irradiation, cette courbe passe par l'origine des coordonnées, tourne sa concavité vers l'axe des abscisses et présente une asymptote parallèle à cet axe. La courbe est déjà très voisine de son asymptote pour un éclat de l'ordre de celui du ciel au nord.

6° Lorsque le champ qui environne l'objet n'est pas complètement privé de lumière, l'irradiation de cet objet est diminuée, et d'autant plus fortement que l'éclat du champ approche davantage d'être égal à celui de l'objet. Si cette égalité a lieu, l'irradiation s'évanouit.

7° Il suit de là que lorsque deux objets d'un éclat égal se touchent, l'irradiation est nulle pour chacun d'entre eux au point ou à la ligne de contact.

8° Deux irradiations en regard et suffisamment rapprochées éprouvent l'une et l'autre une diminution. Cette diminution est d'autant plus considérable que les bords des espaces lumineux d'où émanent les deux irradiations sont plus voisins.

9° L'irradiation augmente avec la contemplation de l'objet.

10° Chez le même individu et pour un objet d'un même éclat, l'irradiation varie considérablement d'un jour à un autre.

11° L'irradiation est modifiée quand on place une lentille devant l'œil ; elle est diminuée par les lentilles convergentes, et augmentée par les lentilles divergentes.

12° Cette action des lentilles paraît ne dépendre que de leur distance focale, et non des courbures absolues de leurs surfaces. Elle paraît d'autant plus prononcée que la distance focale est plus courte.

13° La cause la plus probable de l'irradiation paraît être celle qui est aujourd'hui admise en général, savoir : que l'excitation produite par la lumière se propage sur la rétine un peu au delà du contour de l'image. On peut, à l'aide de ce principe, qui est d'ailleurs appuyé sur des faits, rendre raison de toutes les lois de l'irradiation observée à l'œil nu ; mais on rencontre des difficultés lorsqu'on envisage l'action exercée par les lentilles.

II. — IRRADIATION OBSERVÉE A TRAVERS LES INSTRUMENTS ASTRONOMIQUES.

14° L'erreur produite, dans les observations astronomiques, par ce qu'on a nommé dans ce cas l'irradiation, provient de deux causes essentiellement distinctes : l'irradiation oculaire et les aberrations de la lunette.

15° Dans cette erreur totale, la partie qui est due à l'irradiation oculaire dépend du grossissement en lui-même, de l'éclat de l'image et de l'œil de l'observateur. Elle est, en outre, notablement diminuée par l'action qu'exerce l'oculaire de la lunette, comme lentille convergente placée devant l'œil, et cette diminution est d'autant plus grande que l'oculaire est plus puissant. En ce qui concerne l'œil de



l'observateur, l'effet doit être différent d'une personne à une autre, et, pour la même personne, il doit varier d'une époque à une autre.

16° Cette même partie de l'erreur totale s'évanouit dans les observations où l'on emploie un micromètre à double usage.

17° L'autre partie de l'erreur totale, c'est-à-dire celle qui unit des aberrations de la lunette, varie nécessairement avec les différents instruments; mais, pour une même lunette, elle peut être considérée comme constante.

18° L'effet de l'irradiation dans les lunettes, ou l'erreur totale provenant et de l'irradiation oculaire et des aberrations de l'instrument, est nécessairement variable, puisqu'il dépend d'éléments variables: il pourra être insensible dans certains cas, et acquérir une valeur notable dans d'autres.

19° Il est possible, même avec une lunette médiocre et un œil très sensible à l'irradiation, d'obtenir, à l'aide de certains procédés, des résultats que l'on puisse considérer comme dégagés de cette erreur totale.

Objections de M. Arago et réponse de M. Plateau. — En présentant à l'Académie des Sciences le beau mémoire que nous venons d'analyser, M. Arago développa diverses considérations qui le porteraient à ne pas admettre l'explication physique que l'habile professeur de Gand a donnée de ses expériences; M. Arago revint aussi sur les observations qu'il avait faites vingt-cinq ans auparavant, pour reconnaître si les mesures des diamètres planétaires, prises avec sa lunette à double image, seraient affectées de quelque irradiation; il parla de l'influence que les diaphragmes placés devant l'objectif sembleraient devoir exercer sur ce genre de mesures, puisqu'ils augment si notablement le diamètre des étoiles. Il annonça, enfin, la publication prochaine d'un mémoire, où il consignerait minutieusement le résultat de recherches qui, d'un côté, touchent à la physiologie, et, par l'autre, se rattachent à plusieurs des plus importantes questions des sciences astronomiques. Cette promesse fut faite en 1839; nous sommes en 1847, et le mémoire n'a pas encore paru. Voici la réponse péremptoire de M. Plateau aux objections de l'illustre secrétaire perpétuel; elle a été insérée dans les comptes rendus.

« Dans la séance du 6 mai dernier, M. Arago a bien voulu entretenir l'Académie de mon mémoire sur l'irradiation, et a présenté en

même temps quelques observations sur la partie théorique de ce travail. M. Arago pense qu'on ne peut conserver l'explication physiologique que j'ai cherché à confirmer, et avance une nouvelle théorie d'après laquelle l'irradiation serait le résultat de l'aberration chromatique de l'œil. Les considérations énoncées par M. Arago n'ayant pas été imprimées, je n'ai pu les connaître d'une manière complète, et j'ignore si elles tendent à réfuter les arguments que j'ai apportés en faveur de la théorie physiologique. Je ne rappellerai donc pas ici ces arguments, et je me bornerai à examiner la nouvelle hypothèse présentée par M. Arago.

« Les physiciens reconnaissent, il est vrai, aujourd'hui, que l'œil n'est pas un instrument parfaitement achromatique; et il suit nécessairement de ce non-achromatisme, que les images des objets sont entourés, sur la rétine, d'une petite bande d'aberration, qui doit augmenter quelque peu les dimensions apparentes des objets lumineux projetés sur un fond obscur, et diminuer celle des objets obscurs projetés sur un fond lumineux. Mais cet effet peut-il être sensible dans les circonstances ordinaires, et la petite bande d'aberration a-t-elle assez de largeur pour que l'on puisse la distinguer et lui attribuer le phénomène connu de l'irradiation? Telle est la question que je crois pouvoir résoudre.

« Je fais d'abord remarquer qu'en vertu de la cause même qui la produit, la petite bande que l'aberration chromatique de l'œil dessine autour des images ne peut être exempte de couleurs. Par conséquent, si l'irradiation manifestée par un objet blanc sur un fond noir était due à cette cause, il semble que l'objet devrait paraître coloré sur les bords. Or, parmi tous les observateurs qui se sont occupés de l'irradiation oculaire, aucun ne fait la mention d'apparences colorées, et dans les nombreuses expériences que j'ai faites sur l'irradiation dans une foule de circonstances diverses, je n'ai jamais aperçu rien de semblable. Cette absence de couleurs visibles pourrait difficilement être attribuée au peu de largeur angulaire de l'irradiation; les personnes chez lesquelles le phénomène a beaucoup de développement se convaincront aisément, en répétant quelques unes de mes expériences ou en observant l'apparence si connue du croissant, que la bande d'irradiation est d'une largeur bien suffisante pour laisser voir ces couleurs si elle en avait.

« En second lieu, je ne vois pas comment il serait facile d'expliquer par cette aberration de réfrangibilité, cette loi singulière à laquelle est soumise l'irradiation, savoir : que lorsque deux objets d'un éclat égal ne sont séparés que par un petit intervalle, chacun d'entre eux diminue l'irradiation de l'autre dans les parties en regard, et cela d'autant plus fortement que les deux objets sont plus voisins, de sorte qu'enfin lorsqu'ils se touchent, l'irradiation est nulle pour chacun d'entre eux au point de contact. Comment admettre une action exercée par une image lumineuse sur l'aberration produite autour d'une autre image ?

« Mais on peut aisément décider par des expériences directes, si l'irradiation oculaire est ou non due à l'aberration chromatique. Il suffit, en effet, d'essayer si l'irradiation se produit encore lorsque l'objet est éclairé par une lumière homogène. Si, dans ce cas, on n'aperçoit plus d'irradiation, on sera en droit d'admettre comme vraie l'hypothèse qui attribue le phénomène à l'aberration chromatique de l'œil ; mais si, au contraire, l'irradiation se montre encore, et au même degré qu'avec une lumière composée égale en éclat à la lumière homogène employée, il deviendra impossible de chercher dans l'aberration dont il s'agit la cause du phénomène. Or, j'ai exécuté ces expériences par le procédé que je vais indiquer.

« La lumière homogène dont j'ai fait usage est celle que donne, comme on sait, la flamme d'un mélange d'alcool, d'eau et de sel. J'ai imbibé de ce mélange un paquet de mèche de coton, que j'ai placé derrière une glace dépolie disposée verticalement. Le mélange, allumé dans l'obscurité, me donnait une flamme volumineuse, et la glace dépolie, observée de l'autre côté, formait un champ lumineux d'un éclat suffisant. Pour rendre la lumière plus homogène encore, j'ai interposé entre la flamme et la glace dépolie un verre jaune d'une couleur intense. Tout étant ainsi préparé, j'ai placé successivement devant la glace dépolie l'appareil à jour décrit dans le § 28 de mon mémoire, et celui qui m'a servi pour mes expériences de mesure, après avoir amené, dans ce dernier, le bord vertical de la plaque mobile dans le prolongement de celui de la plaque fixe. Ces appareils se trouvaient ainsi projetés sur un champ d'un éclat assez considérable et d'une lumière tellement rapprochée de l'homogénéité, qu'en les observant par réfraction à travers un prisme placé verticalement

à cinq mètres de distance, leur image conservait non-seulement une grande netteté, mais ne présentait latéralement qu'une nuance verdâtre si légère qu'il fallait beaucoup d'attention pour l'apercevoir. Je ne dois pas oublier de dire que, pour donner aux yeux plus de sensibilité, les expériences n'ont pas été faites le jour dans une chambre obscure, mais la nuit.

« Or, dans les circonstances que je viens de décrire, et qui devraient nécessairement exclure les effets qui auraient pu dépendre de l'aberration de réfrangibilité, les appareils ci-dessus m'ont fait voir une irradiation très développée. Le même résultat s'est montré à MM. Burggraeve et Le François, deux des personnes qui m'avaient aidé dans les expériences de mesures rapportées dans mon mémoire, et qui sont, par conséquent, habituées à juger des phénomènes d'irradiation. Pour comparer ensuite les effets produits à ceux que ferait naître une lumière composée et d'un éclat semblable, j'ai placé à côté de la glace dépolie ci-dessus une autre glace pareille, derrière laquelle j'ai placé, allumées, plusieurs bougies disposées de façon à l'éclairer d'une manière uniforme, et j'ai éloigné ou rapproché ces bougies, jusqu'à ce que l'éclat de cette seconde glace parût égal à celui de la première. Un écran opaque séparait d'ailleurs la bougie de la flamme d'alcool, de manière que chacune des glaces ne recevait qu'une seule des deux lumières. J'avais ainsi deux champs lumineux d'un même éclat, mais dont l'un était éclairé par une lumière jaune homogène, et l'autre par une lumière qui, sans être blanche comme celle du jour, est cependant évidemment assez composée pour le cas dont il s'agit.

« J'ai placé alors devant ces deux champs lumineux des appareils d'irradiation identiques entre eux, de manière qu'en les observant simultanément, il était aisé de voir si les irradiations développées par les deux lumières différaient sensiblement entre elles. Or, cette comparaison, faite par les deux personnes dont j'ai parlé plus haut et par moi, ne nous a montré aucune différence appréciable ; les deux appareils manifestaient une irradiation prononcée, mais celle qui provenait de la lumière composée n'avait ni plus ni moins d'étendue que celle que faisait naître la lumière homogène.

« Ces faits conduisent donc, me semble-t-il, à ces conclusions nécessaires, que s'il faut admettre l'existence de l'aberration de réfran-

gibilité dans l'œil, on doit attribuer l'irradiation à une autre cause, et que l'effet de l'aberration doit être considéré comme entièrement masqué, dans les circonstances ordinaires, par la bande d'irradiation.»

M. Arago a renvoyé à la publication de son mémoire l'examen de la réponse de M. Plateau. Attendons !

DES COULEURS PRODUITES DANS L'ŒIL PAR LA PRESSION OU D'AUTRES CAUSES INDIRECTES. — Ce n'est pas seulement la lumière qui produit dans notre œil la sensation de la clarté. On sait incontestablement aujourd'hui que toute irritation, de quelque nature qu'elle soit, qui se porte sur la rétine, se produit à nous sous forme lumineuse. Comprimez, par exemple, les veines jugulaires, quoique vous soyez dans la plus profonde obscurité, vous verrez se produire devant vos yeux une multitude d'éclairs et de rayons lumineux. Dans une foule de circonstances, même les plus ordinaires de la vie, les couleurs les plus variées apparaissent à nos yeux sans qu'il soit besoin de l'influence de la lumière extérieure. Les causes accidentelles principales de la production des couleurs sont :

1° *Irritation mécanique ou pression.* — Une légère compression exercée sur l'angle externe d'un œil produit une tache jaune dans le même angle de l'autre œil s'il est fermé, et une tache bleue s'il est ouvert ; c'est une expérience que tout le monde peut faire et fait tous les jours. Newton, déjà, avait remarqué qu'une faible pression exercée sur le globe de l'œil, ou qu'un coup sur l'œil, produisait la sensation de la couleur. Newton croyait que les couleurs s'évanouissent en une seconde, quand l'œil et le doigt demeurent en repos. M. Brewster a prouvé que les couleurs continuent tant que dure la pression. Il a montré aussi que, quand on presse l'œil de manière à comprimer légèrement la substance pulpeuse de la rétine, il se produit une tache circulaire de lumière incolore, quoique l'œil soit dans une obscurité complète et n'ait pas été exposé à la lumière depuis plusieurs heures. Si l'œil est alors éclairé, on trouve que la partie comprimée de la rétine est plus sensible à cette lumière qu'aucune autre partie, et paraît, en conséquence, plus lumineuse. Une légère compression de la rétine augmente donc la sensibilité pour la lumière qu'elle reçoit, et fait naître une sensation de lumière. Au contraire, ajoute M. Brewster, quand la rétine est dilatée sous l'influence de la lumière, elle éprouve une cécité absolue ou devient in-

sensible aux impressions lumineuses. Ces propriétés de la rétine se présentent souvent d'elles-mêmes involontairement, avec différentes modifications, en conséquence du mouvement du globe de l'œil par ses propres muscles.

Lorsqu'elle est trop faible pour produire une impression lumineuse, la pression peut modifier d'autres impressions produites d'abord sur la rétine. Si, après avoir été dirigé vers le soleil, l'œil voit un spectre brun rosâtre, une pression sur une autre partie de la rétine fera passer le spectre au vert, et le brun reparaîtra quand cessera la pression.

Quand la pression s'exerce à la fois sur les deux yeux, les apparences lumineuses deviennent bien autrement remarquables, et, ce qu'il y a de particulier, c'est qu'elles affectent alors une forme régulière qui paraît être la même chez tous les individus. Si, par exemple, l'on exerce simultanément une pression sur les deux yeux dans des directions opposées et qui tendent à séparer les deux globes ou à les rapprocher, on apercevra d'abord une lumière rouge bleuâtre ; puis, au bout de quelques instants, une lumière d'un blanc jaunâtre. Presque en même temps, cette lumière se séparera comme en petits losanges qui se distribueront régulièrement sur un faisceau de droites qui concourent vers un même centre, et qui ne paraissent pas s'écarter de plus de 45° de chaque côté de la perpendiculaire à la droite, qui passe par les centres des deux yeux. Le faisceau de droites ne se montre qu'un instant très court, et paraît dégénérer en hyperboles ayant toutes pour axe commun la perpendiculaire dont nous venons de parler, et des foyers communs où viennent se placer deux taches uniformes et rougeâtres ; ces foyers s'écartent ensuite, et le fond de ce tableau brillant devient très onduleux. Dès que la pression a cessé ou qu'elle vient à se ralentir, on n'aperçoit plus qu'une tache noire entourée d'une lumière jaunâtre, et couverte de filaments rouges et jaunes qui s'agitent avec une très grande rapidité. Quand on continue à tenir les yeux couverts, cette tache et le cercle qui l'entoure finissent par prendre une teinte jaunâtre uniforme qui persiste encore très longtemps et s'éteint graduellement. On voit rarement ce phénomène avec toutes les circonstances que nous venons de décrire, parce qu'il faut quelque habitude pour le produire et l'observer, et que la pression sur les yeux, qui est assez douloureuse, doit être suffisamment forte.

2° *Électricité.* — La commotion galvanique produit non-seulement une espèce d'éclair devant les yeux, mais encore le sentiment de différentes couleurs, selon la différente application des pôles. Quand on met le pôle zinc ou positif dans la bouche, et le pôle cuivre ou négatif au milieu du front, l'œil perçoit la sensation d'une tache de couleur violette ; si l'on change ces pôles, la tache devient jaune.

3° *L'imagination.* — Chez certaines personnes, elle agit sur l'organe de la vision de telle manière que si elles représentent un objet quelconque, cet objet se montre à l'instant devant leurs yeux avec sa couleur et sa forme naturelles. Goëthe assure que quand il fermait les yeux et qu'il pensait à une fleur, cette fleur se présentait aussitôt devant lui. Chaque fois que Newton, après l'expérience dont nous avons parlé, pensait au soleil, cet astre se présentait à l'instant devant ses yeux, même au milieu de l'obscurité la plus profonde. Après plusieurs années, il aurait pu, s'il avait osé risquer de nouveau ses yeux, reproduire à volonté ces sensations par le pouvoir de son imagination.

4° *Les causes internes.* — La congestion du sang, l'irritation lymphatique de l'œil, l'inflammation, etc., provoquent aussi des sensations de couleur. Dans des cas particuliers d'indisposition, la pression des vaisseaux sanguins sur la rétine produit des masses flottantes de lumière visibles dans l'obscurité : d'abord du *bleu pâle*, puis du *vert*, puis du *jaune*, et quelquefois même du *rouge*. Toutes ces couleurs sont vues occasionnellement sur les bords de la masse lumineuse.

Ondulations excitées dans la rétine par l'action de points lumineux et de lignes. — Les observations suivantes sont dues à M. Brewster. Si l'on regarde par une ouverture étroite, d'environ un demi-millimètre, vers une partie éclairée du ciel ou vers la flamme d'une chandelle, on verra le fond lumineux couvert d'un grand nombre de lignes parallèles brisées, alternativement lumineuses et obscures. Ces lignes sont toujours parallèles à la fente étroite, et changent naturellement de place pendant que la fente tourne circulairement devant l'œil. A travers un certain nombre de fentes parallèles, comme à travers les dents d'un peigne, les lignes brisées parallèles sont vues plus distinctement, et, si l'on donne au peigne un mouvement oblique à la direction de ses dents, les lignes brisées de-

viennent plus distinctes encore, quoique moins droites que d'abord, et l'on voit de nouvelles lignes noires placées dans différentes directions, comme si c'étaient des portions détachées d'un grand nombre de ramifications obscures. Tous ces phénomènes se voient mieux en employant de la lumière homogène. Si l'on prend deux systèmes de fentes étroites et qu'on les croise sous différents angles, on voit deux systèmes de lignes brisées se croisant mutuellement sous les mêmes angles; et si, quand les lignes des deux systèmes sont parallèles, on donne à l'un d'eux un mouvement rapide et alternatif, perpendiculairement à la direction de ses fentes, les franches parallèles brisées s'aperçoivent avec une netteté particulière.

On peut voir des phénomènes analogues à ceux qui viennent d'être décrits en regardant des lignes noires et parallèles tracées sur du papier blanc, comme celles qui représentent la mer sur une carte gravée, ou en regardant le ciel par les intervalles lumineux laissés entre des fils parallèles. Si l'œil observe fixement et continuellement ces objets, les lignes noires perdent bientôt leur direction droite et leur parallélisme, et elles présentent des espaces lumineux circonscrits à peu près comme les anneaux d'un certain nombre de chaînons. Quand ce changement a lieu, l'œil qui le voit éprouve un sentiment de malaise, effet qui se produit aussi dans l'œil fermé. Lorsque cet effet éblouissant a lieu, les espaces lumineux entre les lignes brisées deviennent colorés, les uns en jaune, les autres en bleu et en vert.

Les phénomènes produits dans ces deux expériences appartiennent naturellement à des *ondulations rectilignes propagées sur la rétine*, et l'interférence et le croisement des ondulations par suite desquels les lignes noires se brisent en portions détachées et les couleurs se produisent, naissent du peu de fixité de la tête et de la main que cause un parallélisme dans les ondulations successives.

L'action sur la rétine de points lumineux petits et dilatants produit des phénomènes très intéressants. Si l'on regarde le soleil par une petite ouverture située à une grande distance de l'œil, ou si l'on observe la petite image du soleil formée par une lentille convexe ou un miroir concave, ou vue sur une surface convexe, la lumière qui tombe sur la rétine ne forme pas une image nette et définie du point lumineux, mais elle envoie dans toutes les directions une infinité de rayons qui couvrent, dans certains cas, presque toute la rétine. Ces

rayons sont extrêmement éclatants et sont quelquefois accompagnés de couleurs bigarrées, d'une variété et d'une beauté remarquables. Le point éclatant propage autour de lui des ondulations circulaires qui sont brisées et colorées par l'interférence, et qui, étant en mouvement constant du centre de la rétine dans toutes les directions, occasionnent les irradiations ci-dessus indiquées. Ce curieux phénomène apparaît dans toute sa splendeur quand on regarde le centre lumineux si concentré et si éclatant qui résulte de l'inflammation d'un jet de gaz oxygène et hydrogène sur un morceau de craie, ou de la combustion des pointes de charbon aux pôles d'une forte pile. Que de fois nous avons contemplé avec étonnement cette zone circulaire de rayons étincelants qui nous apparaissaient sous forme de lignes droites discontinues parsemées à des distances égales de points tour à tour excessivement brillants et obscurs.

Si l'on regarde par une étroite ouverture les centres lumineux que nous venons de décrire, il se produit un effet très singulier. Un tourbillon de rayons circulaires se montre de chaque côté du point brillant, et ces rayons ont un mouvement rapide de tournoiement. Cette configuration remarquable des rayons est évidemment produite par l'union d'un système d'ondulations parallèles avec un système d'ondes sphériques ou circulaires; les intersections des franges parallèles et des irradiations divergentes forment les rayons circulaires comme dans le cas des caustiques ordinaires.

Tous ces phénomènes, ajoute M. Brewster, quelle que soit leur véritable cause, montrent évidemment que la lumière qui tombe sur la rétine exerce une action même sur les parties qui ne la reçoivent pas directement, et que la même action rend d'autres parties de la rétine insensibles à la lumière qui tombe actuellement sur elles.

M. Péclet a fait, de son côté, une observation non moins curieuse. Quand on regarde le ciel à travers une fente d'un demi-millimètre de largeur, on aperçoit des raies obscures, irrégulièrement distribuées dans la fente, mais toujours de la même manière, quelles que soient la grandeur, la forme et la nature du corps éclairant : elles ne changent même pas quand le corps éclairant est assez étroit pour donner des franges par diffraction ; et quand on couvre la fente par un verre coloré, les raies vues à travers le verre sont sur le prolongement de celles qui se forment dans la partie libre de la fente. Ces raies chan-

gent de place et s'affaiblissent quand on augmente la largeur de la fente; au delà d'un millimètre, on n'en aperçoit plus que de très faibles, placées près des bords. Quand on éloigne la fente, les raies deviennent moins nombreuses, plus nettes, et disparaissent complètement à la distance de la vision distincte. Lorsqu'on place une fente étroite devant l'œil, et qu'on incline la fente ou la tête, les raies changent de place et de disposition. Il semble résulter évidemment de ces faits que les raies dont il est question se forment dans l'œil. On en explique très bien l'origine en admettant qu'il existe dans l'organe un certain nombre de points obscurs et d'un très petit diamètre; car chaque point lumineux de la fente projettera sur la rétine une ombre de ce point, et la suite des ombres formées par les différents points de la fente forment une ligne obscure qui lui sera parallèle; cette hypothèse satisfait à toutes les particularités du phénomène. Des expériences décisives constatent d'ailleurs l'exactitude de l'explication précédente. On place entre l'œil et une fente étroite une lame de verre sur laquelle on a fait, avec de l'encre de Chine, un point noir très petit, et l'on voit une raie obscure parallèle à la fente. Si l'on regarde le ciel à travers une fente étroite dont on puisse à volonté diminuer la longueur au moyen d'une plaque mobile dont le bord est perpendiculaire à sa direction, quand l'orifice a une longueur qui diffère peu de la largeur, on aperçoit un champ circulaire parsemé de points obscurs, toujours disposés de la même manière par rapport à l'œil; et par l'allongement de la fente chaque point obscur produit une raie. Quant à la nature des points obscurs de l'œil, M. Péclet pense qu'ils proviennent de la structure mamelonnée de la cornée transparente ou de l'enveloppe de l'humeur aqueuse; car chaque petit mamelon se comporterait comme une lentille d'un court foyer, la lumière qui les aurait traversés se disperserait dans un cône très ouvert, et chacun d'eux porterait sur la rétine une ombre comme un corps opaque.

Il faut nécessairement chercher dans les raies de M. Péclet l'explication d'une illusion par laquelle M. Zantedeschi s'est laissé fasciner. Ce physicien italien n'a pas craint d'annoncer au monde savant, comme une découverte très digne d'attention et qui aurait échappé à l'œil si clairvoyant de Fraunhofer, la présence dans le spectre solaire de raies non plus transversales, mais longitudinales ou

parallèles aux dimensions en longueur du spectre. Si elles avaient existé comme partie intégrante du spectre, à l'égal des raies de Fraunhofer, les nouvelles bandes obscures auraient été complètement inexplicables, ou mieux elles n'auraient eu aucun sens. Elles ne sont heureusement qu'une particularité extrinsèque; elles proviennent nécessairement ou des petits grains de poussière inséparables des bords de la fente, ou même des globules obscurs de l'œil.

Encore un fait singulier observé par M. Libri. Si l'on trace sur un mur blanc une ligne noire et verticale de peu de longueur, et si l'on se place ensuite à une certaine distance de ce mur, distance qui varie, pour un même observateur, avec la largeur de la ligne, la quantité de lumière réfléchie, etc. ; si, de plus, après avoir fermé un œil, on place un fil très mince près de l'autre, de manière qu'en regardant le mur et la ligne qui s'y trouve tracée, l'image du fil semble couper obliquement cette ligne, le fil paraîtra, au point d'intersection, être pour ainsi dire partagé en deux parties, dont l'une s'élèvera parallèlement à sa direction première, et dont l'autre s'abaissera. Ces parties laisseront entre leurs extrémités correspondantes un petit espace vide qui sera justement le lieu que l'image vraie devrait occuper. On doit observer que la partie supérieure paraîtra toujours s'abaisser, et la partie inférieure paraîtra, au contraire, au-dessus de sa hauteur véritable. Si l'on diminue l'obliquité du fil et qu'on détermine peu à peu sa projection à couper perpendiculairement la ligne tracée sur le mur, on verra graduellement se rapprocher les deux extrémités des images, puis se former un seul fil; et ensuite se présenteront les mêmes apparences en sens inverse, lorsqu'en continuant à faire tourner le fil, on le rendra de nouveau oblique dans une position opposée à la première.

Sur les procédés pour rendre visibles les ramifications de la rétine. — L'expérience suivante a rendu plus facile, au point de vue physiologique, l'explication d'un certain nombre de faits : elle est due au professeur Purkinje, de Breslau. Si l'on tient une chandelle devant l'œil, à la distance d'un pied environ, dans une direction déviant un peu de la ligne de vision distincte, l'œil aperçoit, en général, une masse de lumière rougeâtre autour de la chandelle, et, dans cette lumière, comme sur un fond, on voit les ramifications des vaisseaux sanguins de la rétine, la base du nerf optique et le *foramen centrale*.

Sir D. Brewster regarde comme l'opinion la mieux fondée que la lumière qui entoure la chandelle est réfléchie sur la rétine par la surface concave intérieure, soit du cristallin, soit de la cornée, et que les objets sont, d'une manière ou d'autre, amplifiés par les surfaces concaves. Sa propre opinion sur ce sujet est que la lumière est propagée de l'image lumineuse de la chandelle, et que la rétine, en contact avec les vaisseaux sanguins, est insensible à la lumière propagée, quoique sensible à la lumière directe ; et, par suite, les vaisseaux sanguins doivent se dessiner en lignes obscures. Comme la rétine ne s'étend pas sur le *foramen centrale*, elle doit en cet endroit naturellement présenter une tache noire, et, quant à la vision confuse du nerf optique, il paraît moins lumineux que la rétine environnante.

M. Wheatstone, qui a varié cette expérience de différentes manières, dit qu'elle réussit le mieux dans une chambre obscure. Quand l'un des yeux étant soustrait à l'action de la lumière, la flamme d'une chandelle est placée à côté de l'œil à découvert, de manière à ne pas occuper la moindre partie centrale du champ de la vision, tant que la lumière de la chandelle est en repos, on ne remarque rien autre chose qu'une diminution de la sensibilité de la rétine pour la lumière ; mais quand la flamme est mue, en s'élevant et en s'abaissant, dans un petit espace, pendant une durée de temps qui varie avec la sensibilité de l'individu sur lequel on essaie l'expérience, le phénomène se présente de lui-même. Les vaisseaux sanguins de la rétine, avec toutes leurs ramifications, exactement comme ils sont représentés dans les planches de Sömmering, se montrent distinctement, et sont projetés en apparence sur un plan devant l'œil, avec des dimensions amplifiées. L'image continue à se manifester seulement pendant que la lumière est en mouvement, elle disparaît immédiatement ou peu après que la lumière a passé à l'état de repos.

M. Wheatstone n'admet pas l'ingénieuse explication de cette apparence présentée par sir D. Brewster ; il pense qu'il n'y a pas difficulté de se rendre compte de l'image ; que c'est évidemment l'ombre résultant de l'obstruction de la lumière par les vaisseaux sanguins répandus sur la rétine. La difficulté réelle était d'expliquer pourquoi cette ombre n'est pas toujours visible. Pour en rendre raison, M. Wheatstone met en avant différents faits qui tendent à prouver *qu'un objet plus ou moins brillant, que le fond sur lequel il est placé,*

devient invisible quand il est continuellement présenté au même point de la rétine, et la rapidité de sa disparitionest d'autant plus grande que la différence des intensités lumineuses entre l'objet et le fond est moindre; mais, en changeant continuellement la place de l'image de l'objet sur la rétine, ou en le faisant agir avec intermittence sur un même point, l'objet peut être rendu visible d'une manière permanente.

Appliquant cette explication au phénomène en question, M. Wheatstone observe que toutes les fois que la flamme de la chandelle change de place, les ombres des vaisseaux tombent sur différents points de la rétine, ce qui est évident par le mouvement de l'image pendant que l'œil reste en repos, mouvement qui est toujours en sens contraire de celui de la flamme : aussi l'ombre, en changeant ainsi de place sur la rétine, reste, d'après la loi établie précédemment, visible d'une manière permanente; mais dès que la flamme est en repos, l'ombre aussi se met en repos, et, par conséquent, disparaît.

M. Wheatstone a fait un instrument pour montrer une modification singulière de cette expérience : il consiste en un plateau circulaire de métal, d'environ deux pouces de diamètre, noirci sur la face extérieure, et percé à son centre d'un trou à peu près égal à l'ouverture d'un fusil; à la face intérieure est fixé un semblable plateau de verre dépoli. En plaçant l'ouverture entre l'œil et la flamme d'une chandelle et mettant la plaque en mouvement, de manière à déplacer continuellement l'image de l'ouverture sur la rétine, les vaisseaux sanguins seront vus comme précédemment, mais d'une manière plus brillante, et les espaces entre les ramifications se montrent avec une innombrable quantité de petits vaisseaux, qui s'anastomosent dans différentes directions qui étaient invisibles dans l'expérience précédente. Au centre même du champ de la vision, il y a un petit espace circulaire dans lequel on ne voit pas de traces de vaisseaux.

Sur la coloration de la rétine et du cristallin, par M. Melloni.— D'après la théorie que nous avons longuement développée et défendue, la vision serait le résultat des vibrations extrêmement rapides, excitées dans la rétine par une certaine série d'ondulations éthérées. Les vibrations dépendraient moins de la quantité de mou-

vement, que d'une disposition particulière de la rétine qui la rendrait apte à vibrer avec plus ou moins de facilité, à l'unisson de telle ou telle vibration éthérée : ce serait, en terme d'acoustique, une sorte de résonnance, provenant de l'accord ou de la relation harmonique établie entre la tension des groupes moléculaires de la rétine et la période d'ondulation du rayon incident. Ces ondulations, placées entre le jaune et l'orangé, qui répondent, comme Fraunhofer l'a prouvé, au maximum d'intensité lumineuse, s'harmoniseraient mieux avec la constitution de la rétine, et leur communiqueraient un mouvement vibratoire plus intense. La quantité de lumière perçue dépendrait de l'intensité des vibrations moléculaires, et la couleur du nombre des vibrations. En admettant que les ondulations rouges et violettes trouvent dans la rétine une consonnance moins parfaite que les ondulations jaunes, on comprend parfaitement que les premières donnent une moins grande quantité de lumière. Cette hypothèse est d'autant plus plausible, que suivie dans ses dernières conséquences, elle conduit à une explication extrêmement heureuse de l'invisibilité des radiations obscures, *chimiques* ou *calorifiques*, placées en dehors du spectre solaire, radiations douées, comme nous le constaterons plus tard, de toutes les propriétés des rayons lumineux, la visibilité exceptée.

Il faut donc admettre nécessairement que les ondulations éthérées des diverses bandes colorées du spectre ont une aptitude différente à exciter les vibrations de la rétine, et que le maximum d'effet appartient à la couleur jaune.

Comme nous l'avons vu encore, les substances qui vibrent avec la même facilité sous l'action des ondulations lumineuses d'une longueur quelconque, sont blanches ; les substances colorées, au contraire, sont celles qui vibrent avec plus d'intensité sous l'influence d'une ou de plusieurs espèces d'ondulations lumineuses, en se montrant moins sensibles aux autres ; or, c'est un fait constant que les ondulations jaunes produisent par *consonnance* le *maximum* d'effet sur la rétine ; la rétine doit donc être jaune et non pas incolore, comme on l'a cru jusqu'à présent. Cette conclusion repose sur une analogie parfaite de propriétés lumineuses entre la rétine et les divers corps de la nature ; on pourrait cependant concevoir que la force vitale pût communiquer à la rétine, même blanche, un degré d'excitabilité

fils; le second, à Genève, par M. Élie Wartman; le troisième, à Paris, par M. Victor Zokalski, en 1841, nous semblent avoir résumé parfaitement tout ce qui touche à cette difficile question; nous les analyserons en quelques pages.

Observations. — Comme le point de départ de toutes les recherches a été l'étude que Dalton fit sur lui-même, et qu'il inséra dans les mémoires de la société littéraire de Manchester, nous la transcrirons fidèlement : « J'ai toujours pensé que souvent on ne donne pas aux couleurs leur véritable nom. Le nom de *violette*, pour désigner la fleur de cette couleur, me paraissait assez propre; mais si on lui substitue le nom du rouge, je trouvais alors cette licence *peu juste* et nullement naturelle; passe encore si on remplaçait ici le mot *violet* par *bleu*, parce que ces deux couleurs me paraissent à peu de chose près analogues, tandis que le rouge et le violet n'ont aucun rapport entre eux. Quand je fis mon cours d'étude sur les sciences, l'optique fixa particulièrement mon attention; la théorie de la lumière et des couleurs m'était familière avant que j'eusse découvert le défaut de ma vision, défaut que j'ai toujours attribué à la confusion qui règne dans la terminologie des couleurs. Dans le courant de l'année 1790, je m'occupai de botanique, et cette étude dirigea particulièrement mon esprit sur les couleurs. Si une couleur était blanche, jaune ou verte, je l'appelais sans hésiter par son propre nom, tandis que je ne faisais presque pas de différence entre le blanc-pourpre, le violet et le cramoisi. Il m'est arrivé souvent de demander à mes amis qu'elle était la couleur bleue et qu'elle était la violette; ils prenaient tous cette demande pour une plaisanterie et me répondaient à peine. Cependant la particularité de ma vision ne me fut bien connue que dans l'automne de 1792. Un jour, j'examinais une fleur de *géranium zonale*, à la lumière d'une bougie. Cette fleur qui, au jour, me paraît bleue, et qui est, en effet, violette, me parut alors entièrement changée. La couleur bleue que je lui croyais avait totalement disparue pour faire place au rouge, qui est pour moi l'opposé exact du bleu. Je ne doutai pas que ce changement de couleur n'eût lieu pour tout le monde, et je le demandai à quelques uns de mes amis. Jugez de mon étonnement quand j'appris que personne, excepté mon frère, ne voyait comme moi.

Cette observation m'apprit que ma vision, aussi bien que celle

de mon frère, différait de celle de tout le monde, et que la lumière artificielle produisait pour nous sur les couleurs des changements que n'apercevaient pas les autres personnes.

» Je remarquai cette particularité deux ans avant que je m'occupasse de recherches sur ce sujet; alors j'eus soin de m'aider des connaissances d'un ami profondément versé dans la théorie des couleurs, dans celle de leurs noms et de leur constitution. Je suis myope, et ce sont les lunettes de cinq pouces de foyer qui me conviennent le mieux. Je vois bien à une distance convenable; mais quand il fait sombre ou trop clair, je ne distingue qu'avec peine. Ce fut sur le spectre solaire que je commençai mes observations; tout le monde y reconnaît six couleurs : le rouge, l'orangé, le jaune, le vert, le bleu, et le pourpre, que Newton a divisé en deux autres couleurs : l'indigo et le violet. Eh bien! moi, je ne reconnais dans ce spectre que deux ou au plus, peut-être, trois couleurs : le jaune, le bleu et le pourpre. Mon jaune contient le rouge, l'orangé, le jaune et le vert de tout le monde; mon bleu se confond tellement avec le pourpre que je ne reconnais là presque qu'une seule et même couleur. La partie du spectre qu'on appelle rouge me semble à peine quelque chose de plus qu'une ombre ou qu'une absence de lumière. Le jaune, l'orangé et le vert sont pour moi la même couleur avec différents degrés d'intensité. Le point du spectre où le vert touche au bleu m'offre un contraste extrêmement frappant et une différence des plus tranchées. La distinction du bleu et du pourpre est loin d'être aussi prononcée pour moi, parce que le pourpre, à mon avis, n'est qu'un mélange de bleu et d'ombre. Quand je regarde la flamme d'une bougie à travers un prisme, les mêmes phénomènes se présentent à peu près; cependant le rouge semble plus vif que celui du spectre solaire. Je vais examiner maintenant comment chaque couleur se présente à moi au jour et à la lumière artificielle.

» *Rouge :* Pendant le jour, je comprends sous ce nom le cramoisi, l'écarlate, le rouge et le violet. Le cramoisi ressemble, selon moi, au bleu auquel on a mêlé un peu de brun foncé; ses variétés ne sont pas assez différentes entre elles pour que je puisse les distinguer. Cette couleur a un aspect grave à côté des couleurs claires. Le drap bleu et le cramoisi ne m'offrent pas de différences tranchées. Le violet se compose de rouge et de bleu; mais il ne produit d'autre

effet sur moi que celui du bleu pâle et affaibli ; si je le mets à côté du bleu clair, il me semble que c'est la même couleur qui a peut-être perdu quelque chose de sa beauté. Je regarde comme bleues la rose, la violette, le trèfle des prés et plusieurs genres de géranium. Une tache d'encre ordinaire sur du papier blanc est pour moi de la même couleur que la figure d'une personne florissante de santé. Le rouge et l'écarlate forment une classe entièrement différente des couleurs précédentes : son prototype est le vermillon et l'uniforme des soldats anglais. Je n'y aperçois pas la moindre trace de bleu. L'écarlate a un peu plus de brillant que le rouge. Le sang, selon moi, ressemble au vert foncé des bouteilles. Des bas tachés de sang ou salis de boue m'offrent la même couleur. A la lumière d'une bougie, le rouge et l'écarlate deviennent plus brillants, plus vifs. Ces deux couleurs, dont l'éclat est si faible au jour qu'elles ressemblent à des cendres gris foncé, deviennent superbes et d'un éclat merveilleux à la lumière artificielle. Le cramoisi perd son bleu et se change en vert jaunâtre. Mais c'est le violet qui change le plus et qui offre la plus grande différence, vu au jour ou à la bougie ; ici, il n'a plus aucune trace de bleu, et il semble composé de jaune et de rouge, comme au jour il est composé de rouge et de bleu.

» Quant au *jaune* et à l'*orangé*, ma vision est absolument la même que celle de tout le monde sur ces couleurs vues au jour ou à la lumière artificielle. Quelques personnes ne peuvent distinguer le jaune à la lumière : je suis, Dieu merci, exempt de ce défaut.

» Le *vert* au jour : je suis certain d'avoir de cette couleur une idée particulière ; il me semble qu'il est peu différent du rouge ; pour lui reconnaître une teinte particulière, je place en vain une feuille de laurier-cerise à côté d'un bâton rouge de cire d'Espagne, ou bien le revers d'une feuille commune près d'un pain à cacheter d'un rouge pâle : il est facile de conclure de là que je vois le vert ou le rouge, ou ces deux couleurs ensemble autrement que tout le monde. L'orangé et le vert clair pour moi se ressemblent beaucoup. Le vert le plus agréable pour moi, c'est le vert très prononcé, et il devient d'autant plus distinct qu'il tire davantage sur le jaune. Je reconnais les plantes aussi bien que tout le monde, et je sais, comme tout le monde, saisir leurs différences ou leurs ressemblances. Cependant une infusion de thé et une solution de foie de soufre, quoique brunes pour toutes les

autres personnes, sont vertes pour moi ; le drap vert qui sert de tapis à certaines tables me paraît brun foncé et sale, et je suis persuadé qu'un mélange de brun et de rouge remplacerait très bien cette couleur ; mais quand ce drap commence à vieillir, qu'il devient jaune pour les autres, il revêt pour moi seulement alors la couleur verte. J'admets, comme tout le monde, qu'il est difficile de reconnaître le vert à la lumière artificielle, et, pour moi comme pour les autres, il se rapproche extrêmement du bleu. Il reste, à la vérité, toujours vert, mais non aussi marqué que les autres solutions dont j'ai parlé plus haut ; solutions vertes qui ne tendent nullement vers le bleu, même à la couleur artificielle, et qui restent toujours les mêmes, si ce n'est qu'elles deviennent un peu plus pâles.

» J'ai fait remarquer plus haut que mon frère ne pouvait reconnaître la couleur du géranium à la lumière d'une bougie. De nombreuses expériences m'ont prouvé ensuite que nous voyons absolument de la même manière, mais différemment de tous les autres.

» Persuadé que les cas de ce genre ne peuvent manquer d'offrir le plus vif intérêt, je me proposai de publier ces particularités sur ma vision. Je me rappelai qu'il se trouvait un cas semblable dans les *Transactions philosophiques*, sur un certain Harris, marin de Maryport, lequel, selon l'expression du rapporteur, *ne put distinguer entre les couleurs.* Le cas de Harris me sembla tout différent du mien ; je crus alors qu'une comparaison pourrait jeter quelque lumière sur la nature de notre imperfection, et j'ai écrit à mes amis de Maryport pour me donner à ce sujet des détails exacts ; je les reçus bientôt, et alors je ne pus plus douter que ce cas ne fût absolument semblable à celui de mon frère et au mien. Il serait trop long de rapporter ici les détails, je me contenterai seulement de faire remarquer que j'envoyai à Maryport plus de vingt échantillons de rubans colorés, en priant les membres de la famille de Harris de les observer au jour et à la lumière artificielle, et de m'envoyer leurs réponses. Le résultat confirma bientôt toutes mes assertions.

» Présumant, d'après cela, que les cas dont nous parlons ne sont pas si rares qu'on le pense, je me proposai d'étudier avec soin la vue des personnes de ma connaissance, et j'en ai trouvé plus de vingt qui pouvaient être placées dans la même catégorie que moi ; une ou deux seulement différaient un peu des autres. Parmi vingt-cinq élèves aux



quels je tâchais d'expliquer un jour ce sujet, il s'en est trouvé deux qui étaient atteints de la même imperfection ; un autre jour, il s'en trouva un dans le même nombre d'auditeurs. Parmi toutes ces personnes, nous étions les seuls, mon frère et moi, qui ne pouvions distinguer le bleu du violet à la lumière du jour, tandis que nous trouvions entre ces deux couleurs une très grande différence à la bougie. Quant au vert, j'ai des preuves certaines que toutes les autres personnes étaient absolument comme nous. Plusieurs d'entre elles distinguent très bien les couleurs, mais elles sont très embarrassées s'il s'agit de donner les noms particuliers et propres à chacune. Toutefois, j'ai observé une vingtaine de personnes dont la vision est semblable à la mienne.

» Notre famille se compose d'une sœur qui s'approche de la maturité, et de trois frères dont deux sont atteints du défaut dont nous parlons. Les autres familles contiennent plus d'individus qui nous ressemblent, quoique rien ne me prouve cependant que les chefs de ces familles, une seule exceptée, aient été sujets à notre imperfection. A part cela seul, nos yeux sont parfaits, et c'est à peine si l'on trouve parmi nous deux ou trois individus myopes. Il est digne de remarque que je n'ai jamais entendu dire qu'une femme ait été atteinte du vice de la vision qui nous occupe dans ce moment. »

Voici une seconde observation détaillée, écrite par un homme distingué, Sommer, qui raconte lui-même l'infirmité dont il eut tant à souffrir.

« La partie sus-orbitaire de mon œil est très prononcée et couverte de sourcils blonds et épais qui forment un arc un peu aplati. Les replis de la paupière supérieure sont parallèles au bord de l'orbite, les paupières inférieures épaisses et les cils peu prononcés. Le bulbe et la cornée sont très peu voûtés, et l'iris, dans toute son étendue, est d'un bleu verdâtre plus foncé vers son bord pupillaire et parsemé de points jaunâtres ; la pupille est normale quant à sa grandeur et à sa mobilité.

» En général, mon œil porte tous les caractères d'une constitution sanguine. Ma vue, excellente dans ma jeunesse, s'est beaucoup affaiblie par mes travaux à la lumière artificielle ; cependant je vois encore très bien de près et de loin. Les différents degrés d'intensité de la lumière exercent sur ma vue la même influence que sur les autres personnes.

» Les mouches volantes qui me passent devant les yeux depuis une dizaine d'années m'alarmèrent au commencement, parce que je prenais ce phénomène comme un prodrome d'amaurose ; mais son état stationnaire me tranquillisa bientôt. Cependant il n'y a aucun rapport entre cet accident et l'imperfection de ma vue relative à la distinction des couleurs ; car, comme j'apportai cette imperfection en naissant, mes parents la remarquèrent aussi bien que moi, et je me rappelle encore une foule d'aventures comiques auxquelles elle donna lieu dans mon enfance.

» Je distingue toujours au soleil le jaune du bleu, le bleu clair du vert, le rouge foncé du noir ; je reconnais très bien ce dernier des couleurs claires ; mais je le confonds souvent avec le vert et le bleu foncé. Le *jaune*, le noir, le *bleu* prononcé, voilà pour moi les couleurs fondamentales. Quoique j'aperçoive bien une différence entre les couleurs que l'on me présente souvent, je ne suis pas cependant capable de les montrer nominativement sans risquer de commettre une erreur. Si je tiens à côté l'un de l'autre une feuille d'arbre et un bâton de cire d'Espagne, je reconnais très bien la différence d'intensité des deux couleurs, mais je ne pourrais affirmer que l'un de ces objets est vert et l'autre rouge, si d'ailleurs l'objet lui-même ne me le faisait deviner. Le bleu peu prononcé et le rouge peu intense ont pour moi une grande ressemblance. Placés l'un près de l'autre, le brun clair qui se rapproche du jaune, le vert un peu plus foncé et le rouge plus prononcé encore, me semblent tous des nuances d'une seule et même couleur. Je confonds le bleu avec le rouge, le vert avec le brun, l'orangé avec le brun clair et une foule d'autres couleurs composées. Je ne connais que de nom le cramoisi, le pourpre, le lilas, le ponceau, etc., et il ne m'est pas possible de m'en faire la moindre idée, quoique sans doute j'aie eu souvent ces couleurs devant les yeux. En général, je ne puis retenir les couleurs, et si l'on m'en montre une série en me les indiquant toutes successivement par leurs noms, je me trompe presque toujours ensuite, si l'on vient à les changer de position.

» Je me rappelle qu'en rencontrant un jour une dame qui portait un chapeau bleu orné de roses, je le crus rouge, de sorte que je ne fis presque aucune distinction entre la couleur du chapeau et les roses.

» Une autre fois, je me trouvais à la promenade ; la pluie survint :

Alors une foule de parapluies rouges se déployèrent, et moi je me mis à en comparer la couleur à l'azur du ciel. Jugez si mes amis qui m'accompagnaient durent rire de ma surprise. C'est que je présumais que ces parapluies étaient bleus, comme la plupart le sont maintenant. Je confonds presque tous les jours la couleur des habits, des fleurs, et il n'est pas une nuance qui ne me rappelle quelque méprise comique qu'elle m'a fait commettre.

» Les pertes auxquelles m'expose quelquefois l'état de ma vision, la crainte qu'on ne m'accuse d'originalité, me font user d'une grande réserve dans l'indication des couleurs, et rechercher avec soin toutes les particularités qui pourraient me les faire connaître et me préciser leur nature. Il y a dans le monde une foule d'objets qui ont chacun une couleur particulière commune, ce qui m'empêche de faire autant de bévues qu'on pourrait bien le présumer. Ainsi je nomme très bien l'habit d'un chasseur *vert*. Je ne me trompe ordinairement pas quand je parle des tuiles, de la viande, qui sont *rouges*, et du ciel qui est *bleu;* mais si le moindre changement de couleur vient à s'opérer dans ces objets, mon jugement est alors promptement et nécessairement en défaut. Je nomme *rouge* la tranche *verte* d'un livre, parce que je sais que la première est plus ordinaire que la seconde, et ce même raisonnement me fait commettre une foule d'erreurs. Pour le peu de couleurs que je connais, je possède une mémoire et une imagination excellentes. La lumière artificielle bouleverse pour moi toutes les nuances, et je n'ose alors indiquer précisément des couleurs que je reconnais très bien au soleil, parce que je ne manque pas de me tromper. Le paysage que Goëthe a fait peindre sans aucune trace de bleu, et que, selon lui, un akyanope doit trouver très bien, n'a rien qui me choque; je n'aurais pas même remarqué l'absence complète du bleu, si je n'avais pas été prévenu. L'arc-en-ciel me semble composé de bleu et de jaune; je sens bien cependant qu'il y a plus de deux nuances, mais je ne pourrais pas les distinguer ni même en saisir la différence. »

Citons, enfin, comme dernier exemple, celui de la famille Harris, raconté par M. Hudart dans une lettre au célèbre Priestley.

« Harris, cordonnier à Maryport, dans le Cumberland, jugeait sans peine de la grandeur et des formes des corps; mais il se trompait sur les couleurs, qu'il ne sut jamais distinguer. Il était bien con-

vaincu que les objets offraient aux regards quelque chose que les autres reconnaissaient facilement et qu'il ne pouvait discerner lui-même, que les autres rendaient par des mots certaines qualités de ces objets qu'il ne pouvait exprimer lui-même qu'avec hésitation et en se trompant. C'est à l'âge de sept ans qu'il commença à s'apercevoir de cette imperfection. Un jour, ayant trouvé un bas d'enfant, il entra dans une maison voisine pour savoir à qui il appartenait. Il observa alors que chacun l'appelait un bas rouge. Cette dénomination n'ayant aucun sens pour lui, il la jugea inutile et crut parler assez clairement en l'appelant simplement un bas. Cette circonstance resta cependant gravée dans son esprit, et quelques autres observations semblables qu'il fit ensuite, l'éclairèrent sur l'état de sa vue.

» La sensation des couleurs étant celle que nous éprouvons la première, il semblera sans doute étonnant qu'il ne se soit pas aperçu plus tôt de ce qui manquait à sa vue. Cette difficulté disparaîtra cependant si l'on observe que ses parents étaient *quakers* et que la sombre uniformité des couleurs, dans leurs habitations comme dans leurs vêtements, est pour cette classe une règle à laquelle ils sont très fidèles. Harris distinguait aussi bien qu'un autre les objets, quelque éloignés qu'ils fussent, quand leur forme suffisait pour lui en donner une idée exacte ; mais sa vue était en défaut pour les corps qui ne sont appréciables que par leur couleur. Ses camarades distinguaient de très loin des *cerises* sur un arbre, où il n'apercevait lui-même que des *feuilles*, et ce n'était qu'en se rapprochant assez pour pouvoir juger de la forme et de la grandeur relative, qu'il parvenait enfin à démêler les fruits parmi les feuilles. Il distinguait très bien le noir du blanc ou d'une lumière vive ; et les autres couleurs pour lui venaient se ranger entre ces deux extrêmes en raison de leur éclat ou de leur obscurité. Aussi lui arrivait-il souvent de confondre ou de comprendre sous un même nom des couleurs très différentes, parce qu'elles avaient pour lui le même éclat. Si on lui présentait un ruban rayé de diverses couleurs, il ne le confondait pas avec un ruban uni, mais il n'apercevait que du clair et du sombre plus ou moins marqué.

» Harris était un homme sensé et très avide de connaissances, surtout de celles relatives à la lumière et aux couleurs. Il fréquentait même pour cela un cours de philosophie naturelle. Deux de ses frères

avaient apporté en naissant le même défaut que lui, mais deux autres frères et deux sœurs en étaient exempts. Un de ses deux frères possédait un navire à Maryport, et M. Hudart l'ayant rencontré un jour à Dublin, il lui proposa d'examiner sa vue, et voici le résultat qu'il obtint de cet examen. « N'ayant pas de prisme à ma disposition, je lui demandai s'il avait déjà vu un arc-en-ciel. Il m'assura qu'il l'avait observé souvent, qu'il en comptait toutes les couleurs, mais qu'il ne pouvait les appeler par leur nom. Je lui présentai un ruban ; il reconnut tout de suite plusieurs couleurs et tâcha de me nommer celle de chacun des carrés dont le ruban était composé. Il distingua les blancs sans hésiter, mais il *confondit les* noirs avec les bruns, disant seulement que c'étaient deux nuances d'une même couleur. Je lui montrai un carré *vert* : il me répondit : « Il me semble que c'est la couleur que vous appelez jaune. » Un carré rouge était *bleu* pour lui, et il était sûr d'avoir vu le *vert* quand je lui montrai l'orangé. Je lui demandai, enfin, s'il croyait que tout ce qu'on appelait *couleurs* n'était autre chose que des nuances de clair et de noir, ou bien s'il croyait qu'il y eût encore quelque autre différence. Il me répondit en hésitant qu'il croyait encore remarquer quelque autre chose, mais dont il ne pouvait se rendre aucun compte. »

Nous excèderions les limites de cet ouvrage, et nous nous écarterions du but que nous avons dû nous proposer, si nous voulions reproduire les observations rassemblées avec soin par les auteurs que nous avons déjà cités ; résumons-les seulement et revenons aux vues théoriques, qui doivent nous occuper exclusivement. M. Seebeck a rangé les daltoniens en deux classes : la première comprend les individus qui se trompent plus sur le degré de coloration que sur la nature de la couleur. Les teintes qu'ils confondent plus ou moins, sont : l'orangé clair et le jaune pur, l'orangé foncé, vert jaunâtre ou brunâtre clair et brun jaunâtre, le vert clair pur, brun gris et couleur de chair, le rouge rosé et le vert plus bleuâtre que jaunâtre et gris, le cramoisi et le vert foncé et brun châtain, le vert bleuâtre et le violet sale, le lilas et le gris bleu, l'azur et le gris bleu et le lilas. Leur sens est très défectueux pour l'impression spécifique de toutes les couleurs en général ; il l'est surtout pour celle du rouge, et, par suite, pour celle du vert, qu'ils ne différencient que peu ou point du gris. Le

jaune est la couleur dont l'appréciation est la plus correcte, quoiqu'ils voient souvent moins de différence entre cette couleur et l'apparence de corps incolores que ne le font les yeux bien conformés.

La seconde division comprend les personnes qui confondent l'orangé clair avec le jaune verdâtre, le jaune brunâtre et le jaune pur, l'orangé vif avec le brun jaune et le vert d'herbe; le rouge, la rouille et le vert olive foncé; le vermillon et le brun foncé, le carmin foncé et le vert bleu noirâtre, la rose couleur de chair, le brun gris et le vert bleuâtre; le gris bleuâtre terne et le gris un peu brunâtre, le rose sale et un peu jaunâtre et le gris pur, le rose rouge avec le lilas, l'azur et le gris passant au lilas; le cramoisi et le violet, le violet foncé et le bleu foncé. Elles n'ont qu'une faible perception des rayons les moins réfrangibles; c'est là leur caractère distinctif le plus saillant et sur lequel repose surtout la distinction des deux classes. Il n'explique pas seulement pourquoi les individus de la seconde classe, comme ceux de la première, confondent le rouge avec le vert obscur; il rendra de plus raison de toutes les différences qui les séparent, si l'on remarque que l'absence des rayons orangés rapproche beaucoup du bleu la lumière incolore et même le rouge.

On sait qu'à mesure que l'obscurité augmente, les rayons les moins réfrangibles disparaissent les premiers de la lumière de l'atmosphère, et que de cette disposition plus prompte naissent les changements de couleur qu'on observe dans cette circonstance. Si donc le défaut de sensibilité pour ces rayons caractérise le daltonisme de la seconde classe, les daltoniens de la première classe doivent, aux approches de l'obscurité, se trouver presque dans les mêmes conditions que ceux de la seconde. Vers le soir, M. Seebeck présenta à l'un des premiers daltoniens deux séries de couleurs, l'une dont il jugeait très sainement, l'autre sur laquelle il se trompait toujours; à mesure que l'obscurité croissait, la première série l'induisait de plus en plus en erreur, tandis que la seconde était de plus en plus mieux appréciée; quand l'obscurité fut assez grande, la seconde série était celle sur laquelle il ne se trompait pas, tandis qu'il errait complètement par rapport à la seconde. Il arriva bientôt à ne plus distinguer, comme les daltoniens de la deuxième classe, à la lumière du jour, le ciel bleu du rose rouge; enfin, il ne jugea plus sainement des couleurs

de la seconde série : les papiers rouges, qui, au jour, lui apparaissaient trop éclatants, se montrèrent alors trop obscurs. Soumis aux mêmes épreuves, les yeux des daltoniens de la deuxième classe se comportèrent tout autrement : l'obscurité d'abord n'avait produit sur eux aucun effet ; leurs jugements sur la seconde série de couleurs étaient invariables ; de plus en plus corrects, ils s'accordaient avec ceux du premier daltonien ; ils s'aperçurent surtout de l'influence de l'obscurité, en ce que le papier rouge devint plus obscur.

L'obscurité ramène donc à la seconde classe les daltoniens de la première ; réciproquement, l'emploi d'un vert orangé clair, placé devant l'œil, ramènerait à la première classe les daltoniens de la seconde. Voilà, sans aucun doute, un aperçu fort original ; la gloire en revient tout entière à M. Seebeck, qui, ici comme dans tous ses travaux, s'est montré physicien profond et habile.

Classification du docteur Szokalski. — M. Szokalski réunit, sous le nom de *chromato-speudopsie*, formé des trois mots grecs : χρωμα, couleur ; ψευδος, faux ; οψις, vision ; les phénomènes que nous avons désignés, avec M. Wartmann, par le mot plus simple de *daltonisme*. Il distingue cinq classes de daltoniens :

1° Celle des personnes chez lesquelles le sens des couleurs manque presque complètement, et qui ne voient à la place des couleurs principales jaune, rouge et bleu, que différents degrés de blanc et de noir : l'existence de cette classe est douteuse, car tous les yeux ont au moins la sensation du jaune ;

2° Celle des personnes qui distinguent aussi le jaune : les objets extérieurs leur apparaissent colorés des nuances qu'engendrent les divers mélanges de jaune, de bleu et de noir ;

3° Celle des personnes qui, non-seulement voient le jaune, mais sont, en outre, capables d'une perception particulière et la même pour le bleu et le rouge : ce sont les *akyanopes* de Goëthe ;

4° Celle des personnes uniquement privées de la sensation du rouge, qui leur paraît gris cendré ;

5° Celle des individus qui distinguent toutes les couleurs, mais non pas d'une manière tranchée : au lieu de pouvoir préciser le mélange de deux couleurs, ils ne voient jamais que l'une d'elles.

Ces divisions sont plus arbitraires que réelles ; elles reposent, il nous semble, sur une étude incomplète et systématique des faits.

Nous aurions une grande confiance dans M. Szokalski comme médecin oculiste, mais sa brochure prouve trop qu'il n'est pas assez physicien ; on dirait même qu'il a pris à tâche d'arracher complètement le daltonisme au domaine de la physique. « La cause immédiate de la chromato-speudopsie, dit-il, consiste dans la confusion des fonctions déterminatives du cerveau qui nous fournissent la perception des couleurs. » C'est une erreur évidemment ; avant la confusion des fonctions du cerveau, confusion imaginaire peut-être, il y a bien certainement une cause physique, l'insensibilité de la rétine. M. Szokalski est convaincu que, nous tous physiciens, nous n'avons des couleurs que des idées fausses : tandis qu'elles sont entièrement et essentiellement subjectives, nous les aurions fait objectives en oubliant le rôle important que notre œil joue dans leur production. Nous ne nous arrêterons pas à repousser un reproche qui n'a rien de fondé ; il n'est pas un physicien qui n'admette *que les couleurs se produisent dans nos yeux ; que la sensation de la couleur repose sur un certain changement dans l'œil, changement qui est produit par l'influence d'un stimulant quelconque* ; mais il faut aller plus loin : les sensations diverses de rouge, d'orangé, etc., naissent nécessairement de stimulants divers ; il y a donc évidemment dans chaque rayon lumineux un caractère distinctif, qui le rend propre à déterminer telle ou telle sensation, et il semble dès lors très naturel qu'on lui attribue la couleur. Mais laissons-là ces discussions inutiles, et analysons le mémoire beaucoup plus méthodique de M. Élie Wartmann.

Nombre des daltoniens. — Le nombre est beaucoup plus considérable qu'on ne le croit communément ; M. Seebeck a trouvé cinq daltoniens sur les quarante et quelques jeunes gens qui composaient les deux classes supérieures d'un gymnase de Berlin. Le professeur Pierre Prévost assurait que sur vingt individus il y a au moins un daltonien.

Signes caractéristiques. — Y a-t-il quelque moyen de décider, à la simple inspection de l'œil d'un individu, s'il est ou n'est pas daltonien ? M. Wartmann n'ose pas affirmer que, dans tous les cas, la réponse doive être négative. Il semble que les daltoniens, dont les yeux sont brun noisette, offrent quelquefois, sous une incidence plus ou moins oblique, un reflet doré d'une nuance particulière ; la présence de ce reflet peut quelquefois faire prévoir le daltonisme. L'on

a prétendu à tort qu'il y avait plus de daltoniens aux yeux bleus qu'aux yeux noirs.

Répartition suivant le sexe. — On ne peut guère douter que le daltonisme soit beaucoup plus commun chez les hommes que chez les femmes. M. Szokalski a rassemblé un certain nombre de femmes et leur a montré séparément des échantillons de rubans, colorés diversement, en priant chacune d'elles, d'indiquer le nom et la nature des couleurs; il fut frappé de l'accord parfait qui existait entre toutes les réponses. La même expérience, faite avec un certain nombre d'hommes, fut loin de donner le même résultat. A peine leur eut-on montré les mêmes échantillons, qu'une vive discussion s'éleva entre eux sur le nom des couleurs. La faculté de discerner les couleurs est donc prédominante chez les femmes; Gall assurait que l'organe du coloris est plus développé chez la femme que chez l'homme.

Influence de l'âge et de la parenté. — Le daltonisme date ordinairement de la naissance. Il est souvent héréditaire; il attaque quelquefois un, deux ou plusieurs membres d'une famille, tandis que les autres en restent tout à fait exempts. Chose bien remarquable, la transmission du daltonisme a lieu plutôt par les femmes que par les hommes, quoique les femmes, comme nous l'avons vu, soient elles-mêmes très rarement atteintes de cette infirmité. M. Cunier, cependant, a récemment constaté l'hérédité du daltonisme dans cinq générations consécutives, et toujours chez les femmes, qui étaient seules attaquées.

Explication du daltonisme. — Quelques personnes ne voient dans cette affection qu'un vice d'intelligence, ou mieux qu'une perturbation des fonctions du cerveau; d'autres admettent une coloration anormale de certaines parties de l'œil qui modifierait les couleurs véritables; les troisièmes, enfin, croient devoir chercher la cause de l'imperfection signalée dans la sensibilité plus ou moins grande, non-seulement de la rétine en général, mais en particulier des diverses fibres nerveuses qui vibrent à l'unisson de telle ou telle couleur, ou qui sont impressionnées par telle ou telle nuance. Nous ne nous arrêterons pas à réfuter la première opinion ; la seconde a été énoncée par Dalton, qui concluait de ses observations personnelles que les humeurs de ses yeux et de ceux de ses élèves étaient colorées en bleu; il plaçait cette coloration particulière dans l'humeur vitrée;

mais les recherches des anatomistes n'ont jamais mis cette coloration en évidence ; son admission, d'ailleurs, n'expliquerait que très-imparfaitement les faits observés : que de personnes portent habituellement des verres bleus sans cependant confondre les couleurs ! Goëthe, au contraire, voulait que les daltoniens ne vissent pas le bleu, mais, à sa place, un pourpre affaibli, un rose et un rouge clairs et purs. Les faits contredisent évidemment cette manière de voir.

De l'ensemble des observations réunies jusqu'à ce jour, on peut tirer, il nous semble, ces deux conclusions : 1° que le daltonisme n'atteint jamais la couleur jaune, ou que tous les yeux voient le jaune ; 2° que les sensations des deux couleurs complémentaires sont inséparables, en ce sens que l'œil est sensible ou insensible pour toutes deux à la fois. L'œil qui perçoit le bleu perçoit aussi l'orangé ; l'œil qui ne voit point le rouge ne discerne pas non plus le vert ; ces deux couleurs sont par lui confondues. Ces deux conclusions résument à elles seules tous les phénomènes du daltonisme. Elles sont d'ailleurs une conséquence nécessaire des théories de MM. Melloni et Plateau : on pouvait les énoncer *à priori*, avant de les retrouver comme conséquences des faits.

Mais ces conclusions une fois admises, il devient évident qu'il faut chercher la cause et l'explication du daltonisme dans une insensibilité anormale de la rétine qui lui enlève la faculté de vibrer à l'unisson de tel ou tel rayon lumineux.

Nous n'insisterons pas davantage sur ce point ; terminons en indiquant le moyen très-simple par lequel Seebeck père redressait jusqu'à un certain point l'erreur commise par les daltoniens dans l'appréciation des couleurs. Ce moyen consiste dans l'emploi des verres, ou plus généralement des milieux colorés. Supposons, par exemple, que tel œil confonde le vert avec le rouge ; il suffira évidemment d'armer son œil d'un verre rouge pour que la différence entre les deux couleurs soit nettement perçue. Rien n'égale la surprise d'un daltonien lorsqu'on lui découvre ainsi les erreurs qu'il commet à chaque instant. Ce moyen, toutefois, ne remédie qu'aux méprises relatives à la nature des couleurs ; elle laisse, en général, subsister celles qui portent sur les nuances d'une même teinte.

SECTION HUITIÈME.

DE LA LUMIÈRE CONSIDÉRÉE DANS SON ACTION SUR DES APPAREILS AUTRES QUE L'ŒIL, SUR DES SUBSTANCES DIFFÉRENTES DE LA RÉTINE. — DE LA NATURE PLUS INTIME DU SPECTRE SOLAIRE; DES DIVERS RAYONS CALORIFIQUES, CHIMIQUES ET PHOSPHOROGÉNIQUES. — DE LA PHOTOGRAPHIE. — DE L'ACTION DE LA LUMIÈRE SUR LES PLANTES, ETC.

Nous n'avons étudié jusqu'ici la lumière que sous le rapport des phénomènes optiques auxquels elle donne naissance, qu'autant qu'elle se manifeste à nos regards; il faut maintenant agrandir le champ de nos recherches, et suivre les progrès rapides de la science dans des régions toutes nouvelles. Toutefois, avant d'entrer en matière, examinons une dernière fois le spectre au point de vue de son éclat lumineux, en rappelant une observation fort juste de M. Melloni et une expérience de M. Mossotti. Si, au moyen de la force réfringente d'un prisme diaphane et incolore, on parvient à séparer les éléments de la radiation solaire, au point que chaque bande munie du spectre puisse être considérée comme formée par une seule espèce de rayons, il est absolument impossible de placer, par cette même force de réfraction, les divers éléments lumineux dans des circonstances identiques; en effet, deux éléments d'une nuance fort rapprochée, c'est-à-dire deux éléments différant très-peu dans l'ordre de la réfrangibilité, devront s'écarter et diverger d'autant plus, en traversant le prisme, qu'ils appartiendront à un groupe de rayons plus réfrangibles, en sorte que les zones supérieures du spectre auront évidemment une densité moindre que les zones inférieures.

Le spectre newtonien ne saurait donc fournir des données exactes sur les rapports des pouvoirs éclairants que possèdent les divers rayons colorés qui entrent dans la composition de la lumière solaire. Pour obtenir ces rapports, M. Mosotti a soumis au calcul les données qui concourent à la formation des spectres fournis par les réseaux,

dans lesquels les couleurs élémentaires s'étalent les unes à côté des autres en vertu de la simple *interférence*, et occupent ainsi des espaces dépendant uniquement de leur période vibratoire ou longueur d'ondulation. Dans ces spectres, exempts du défaut signalé ci-dessus, M. Mosotti a trouvé le point le plus éclairé au beau milieu du jaune, qui est lui-même placé à égales distances des deux extrémités. Il a trouvé de plus que l'intensité lumineuse décroît régulièrement et également des deux côtés, de sorte que la limite rouge et la limite violette sont les points les moins éclairés du spectre, et possèdent tous deux la même intensité lumineuse. C'est aussi de cette manière, comme nous l'avons déjà rappelé, que M. Mosotti a démontré que les couleurs de ces deux limites sont constituées par des ondes éthérées dont les longueurs respectives ont entre elles le rapport remarquable de 2 à 1.

DES PROPRIÉTÉS CALORIFIQUES DU SPECTRE SOLAIRE OU DES DIVERS RAYONS COLORÉS. — C'est un fait universellement reconnu, que le spectre solaire échauffe en même temps qu'il éclaire : on peut même et l'on doit affirmer, en partant de la seule théorie possible aujourd'hui sur la nature et les rapports de la lumière et de la chaleur, que ces deux agents merveilleux sont inséparables l'un de l'autre ; que la chaleur produit, dans tous les cas, des mouvements lumineux dont l'intensité est très souvent trop faible pour qu'ils puissent devenir sensibles à l'œil, et que la lumière, à son tour, développe, dans tous les cas, une certaine quantité de chaleur souvent inappréciable à l'aide des instruments trop imparfaits dont nous faisons usage. On faisait contre cette manière de voir une objection longtemps insoluble. La lune, disait-on, brille d'un éclat assez intense, et cependant la lumière qu'elle émet, concentrée même au foyer des plus grandes lentilles, ne produit aucune chaleur. M. Melloni, déjà si célèbre par tant de découvertes inattendues, a démontré récemment jusqu'à l'évidence la puissance calorifique de la lumière de la lune ; nous lui emprunterons le récit de son triomphe, plein, on le reconnaîtra, d'enseignements précieux.

« Une lentille à échelons, d'un mètre de diamètre, destinée à l'observatoire météorologique du mont Vésuve, venait de m'arriver. Pour étudier sans danger l'ajustement des divers anneaux, ainsi que la distance et l'étendue du foyer, j'exposai cette magnifique pièce

d'optique à un beau clair de lune, et l'amenai dans un plan exactement perpendiculaire à la direction des rayons. La lumière se concentra à un mètre environ de distance, sur un espace circulaire d'un centimètre de diamètre. Ce petit cercle très brillant, et assez nettement terminé, avait une étendue sensiblement égale à la section des tubes qui garnissent mes piles thermoscopiques, ce qui me suggéra l'idée d'essayer son action sur ces piles. Une déviation considérable se développa sur le rhéomètre multiplicateur, aussitôt que les rayons, pénétrant dans l'intérieur du tube, vinrent frapper la face antérieure de l'appareil. Étonné de la vivacité de cette action, et me doutant bien qu'elle ne dérivait pas de la chaleur lunaire, je plaçai la main à une certaine distance au devant de l'ouverture ; l'index du rhéomètre retourna aussitôt à zéro, le dépassa, et prit une déviation contraire, preuve évidente que son mouvoir primitif dérivait d'un rayonnement *frigorifique*, c'est-à-dire d'un abaissement de température dans la face de la pile exposée au foyer. L'origine de ce froid était facile à assigner. Comme la lentille se trouvait sur un balcon découvert et sous un ciel parfaitement pur, elle devait, à cause du grand pouvoir émissif du verre, rayonner sa chaleur en abondance vers l'espace, et abaisser ainsi sa température au-dessous de celle de la pile, qui était enveloppée dans son étui métallique et placée dans l'intérieur de l'appartement. Tant que la pile était abritée par le couvercle en métal, le faible rayonnement de celui-ci ne leur permettait pas de ressentir l'influence de ce froid de la lentille ; mais aussitôt que ce couvercle était abaissé, l'échange calorifique avait lieu entre les deux corps, et la pile, perdant plus qu'elle ne recevait, devait nécessairement abaisser la température de la face découverte, et produire ainsi le courant électrique qui causait la déviation de l'aiguille du rhéomètre. Pour remédier à cet inconvénient, je transportai la lentille en dedans de la croisée qui donnait sur le balcon, et je fis appliquer à la croisée une natte qu'on pouvait aisément relever pour introduire dans l'appartement les rayons lunaires, ou faire descendre pour les intercepter. Je tins la natte baissée jusqu'à ce que l'équilibre de température fût établi, et après m'être assuré qu'on n'obtenait aucune déviation au rhéomètre lorsqu'on abattait le couvercle de la pile, placée toujours au foyer de la lentille, je fis arriver sur l'instrument la lumière de la lune : il se manifesta une déviation

de quelques degrés du côté de la chaleur. Je répétai aussitôt l'expérience, et, à ma grande surprise, la déviation eut lieu en sens contraire.

» Quelques instants de réflexion suffirent pour me convaincre que ces changements de direction tenaient, selon toute probabilité, à des bouffées d'air extérieur qui entraient de temps en temps dans la chambre et se faisaient jour jusqu'à la face découverte du thermoscope. On aurait pu aisément disposer les choses de manière que l'air ne pût trouver accès derrière la lentille ; mais guidé par ma théorie de l'identité entre la chaleur et la lumière, et par l'expérience bien connue de Saussure, relativement au thermomètre placé au fond d'une caisse vitrée, je crus qu'on parviendrait mieux au but en introduisant dans l'intérieur du tube deux diaphragmes de verre parfaitement diaphanes et bien polis sur leurs quatre faces : le premier à une petite distance de la pile, le second tout près de l'ouverture. Je montai donc de cette manière les tubes de ma pile, et à la première occasion favorable, je refis l'expérience. L'index de l'appareil resta d'abord stationnaire pendant quelques instants, puis il commença à dévier lentement, et, après quatre à cinq minutes, il s'arrêta d'une manière stable à 3°, 7. Je retirai la pile du foyer, et je la plaçai à côté, son ouverture toujours tournée vers le centre de la lentille ; la déviation commença aussitôt à diminuer, et en quelques minutes l'index revint au zéro. Je répétai plusieurs fois la même opération, en retirant la pile tantôt d'un côté, tantôt de l'autre, et toujours l'aiguille dévia étant au foyer et retomba au zéro hors de cette position. Il va sans dire que le sens de la déviation correspondait à celui de l'action calorifique.

» L'expérience était donc parfaitement nette et ne pouvait pas laisser l'ombre d'un doute. J'eus l'occasion de la répéter plus tard en présence de M. Belli, professeur de physique à l'université de Pavie, de MM. Mossotti et Lavagna, de l'université de Pise, et de plusieurs autres savants distingués, qui tous sont sortis de mon cabinet intimement convaincus que la lumière de la lune est calorifique.

» Lorsque je réfléchis que les physiciens qui tentèrent de découvrir la chaleur lunaire dans le courant du siècle dernier, employèrent, d'après Lalande, des lentilles de 1^{m} et 1^{m} 33 de diamètre et le thermoscope extrêmement sensible d'Amonton, je soupçonne fortement que les résultats négatifs annoncés par ces physiciens tenaient,

en grande partie, au froid engendré dans leurs lentilles par le rayonnement céleste, réuni au refroidissement causé par les agitations de l'air extérieur, auquel leurs instruments se trouvaient exposés; en sorte que je ne désespère pas du tout de rendre le phénomène sensible avec les thermoscopes ordinaires à dilatation.

» En attendant, par l'emploi de mes moyens actuels d'observation, j'ai pu m'assurer que l'action varie, comme on devait bien le prévoir, non-seulement avec l'âge, mais aussi avec la hauteur de cet astre au-dessus de l'horizon : une petite déviation du plan de *la lentille* hors de la direction normale aux rayons diminue considérablement l'effet. Dans ces différentes circonstances, j'ai eu des déviations qui ont varié depuis 0°,6 jusqu'à 4°,8. L'action à travers les verres se fait d'une manière si lentement graduée, que l'index de l'appareil se meut avec une régularité admirable, et sans subir la moindre oscillation, soit en sortant de la position d'équilibre lorsqu'on place ce corps hors du foyer, en le maintenant toujours en présence de la lentille. Effectuée sous différentes lunaisons, l'expérience a toujours réussi, c'est-à-dire que le résultat a été plus ou moins prononcé, mais indiquant toujours une augmentation de température. Je répéterai donc que le fait de l'existence de la chaleur dans le rayonnement de la lune est parfaitement sûr; il ne s'agit plus maintenant que de mesurer cette action calorifique et de voir : 1° quelle est sa valeur en degrés thermométriques; 2° quelle est son rapport avec le rayonnement solaire. Je vais tâcher de résoudre ces deux questions; mais, à propos de la dernière, sous quel degré d'approximation doit être considérée la fraction $\frac{1}{300,000}$ donnée par Bouguier pour représenter le rapport de l'intensité lumineuse de la lune à celle du soleil? »

Nous ne savons pas si M. Melloni a rempli sa promesse; mais, bien certainement, il n'a pas publié les résultats par lui obtenus.

Inégale répartition de la chaleur dans les diverses parties du spectre solaire. — Rochon, le premier, entreprit de faire avec le thermomètre l'analyse du spectre solaire. Il plaça d'abord son instrument dans la lumière rouge, et constata une certaine élévation de température qui allait toujours en diminuant du rouge au violet, où elle atteignit son minimum. Herschel, de son côté, répéta les mêmes expériences, et nous nous faisons un devoir de reproduire divers

passages des mémoires qu'il publia sur ce sujet et qui furent imprimés dans les *Transactions philosophiques* de 1800. « Il est, dit-il en débutant, quelquefois très utile en physique de douter des choses qui sont généralement admises, surtout quand les moyens d'éclaircir nos doutes, lorsqu'ils ont une fois pris naissance, sont à notre portée. Toute expérience qui nous conduit à rechercher la vérité d'un principe ou d'un fait qu'on admettrait de confiance, peut devenir extrêmement importante dans ses résultats. Ainsi, par exemple, lorsque nous voyons l'effet des rayons du soleil condensés au foyer d'un verre ardent, il semble naturel de supposer que chacun de ces rayons réunis contribue également à produire l'intensité de chaleur qu'on observe ; et nous trouverions très absurde qu'on vînt nous dire que la plupart de ces rayons n'ont que peu d'influence dans la combustion qui a lieu au foyer de la lentille... Dans une suite d'essais que j'ai faits sur la manière d'observer le soleil avec de grands télescopes, j'employais diverses combinaisons de verres différemment colorés, pour obscurcir l'image de cet astre. Je fus étonné de voir qu'avec certains verres j'éprouvais une sensation de chaleur quoique je n'eusse que peu de lumière, tandis que d'autres me donnaient beaucoup de lumière et à peine la sensation de chaleur. Or, comme, dans ces combinaisons variées, le soleil me paraissait aussi diversement coloré, il me vint à l'esprit que les rayons, séparés par le prisme, pourraient avoir la faculté calorifique fort inégalement distribuée entre eux, et ce doute une fois existant, je dus le porter également sur la faculté lumineuse. Si certaines couleurs se trouvaient plus propres que d'autres à produire de la chaleur, d'autres, en revanche, pouvaient servir plus efficacement l'organe de la vue en possédant une faculté d'éclairement plus énergique. A tout hasard, il convenait de ne se décider là-dessus que d'après l'expérience. »

Herschel se mit immédiatement à l'œuvre, et démontra, par des expériences directes, que la faculté calorifique des rayons rouges est beaucoup plus grande que celle des rayons verts ; il évalua la différence dans le rapport de 55 à 26.

Il éclaira ensuite un microscope avec les divers rayons colorés, et constata que chaque fois qu'on passait d'une couleur à l'autre, il fallait changer le foyer de la vision distincte. L'objet se voyait bien dans la lumière rouge, mieux dans l'orangée, mieux encore dans la

jaune, au moins aussi bien dans la verte; moins bien dans le bleu et l'indigo, plus imparfaitement encore dans le violet : le maximum d'éclairement était dans le jaune le plus brillant. Il fit encore cette observation curieuse : en n'admettant dans le microscope que des rayons d'une seule couleur, on supprime le grand obstacle à la vision distincte, l'inégale réfrangibilité; aussi l'instrument y gagne en netteté. Il termine en se demandant si les propriétés chimiques des couleurs prismatiques ne seraient point aussi différentes entre elles que le sont leurs facultés calorifiques et lumineuses? « On *trouverait* aisément, dit-il, des moyens de le reconnaître, et l'on ne saurait mettre trop d'ardeur dans les recherches qui ont pour objet l'analyse de la lumière, le plus subtil des principes actifs qui influent sur les opérations de la nature. Si on la connaissait mieux, on expliquerait peut-être certains faits qu'on observe tous les jours, mais dont on n'a pas pu encore se rendre compte. Si, par exemple, les rayons rouges ont éminemment le pouvoir calorifique, cela explique cette chaleur agréable que donnent un feu de charbon sans flamme et tous les combustibles en général qui fournissent une lumière rouge. On voit aussi pourquoi les flammes jaunes, vertes, bleues et violettes qu'on produit en brûlant des esprits ardents mêlés de sels, donnent si peu de chaleur qu'on peut y plonger la main sans se brûler. S'il résultait encore de l'analyse chimique de la lumière que cette faculté acidifiante qu'on était tenté d'attribuer à la lumière en général, d'après les changements qu'elle produisait sur certaines substances, n'appartient qu'à une seule classe de rayons colorés, tandis que les autres auraient des propriétés différentes, on serait fondé à conclure que les corps peuvent être diversement affectés par la lumière, selon qu'ils reçoivent ou retiennent, ou bien selon qu'ils transmettent et réfléchissent les diverses couleurs dont elle est composée. » Que de grandes pensées! ce sont bien là les divinations du génie!

Dans un autre mémoire, Herschel va plus avant et réalise une des plus brillantes découvertes de ce siècle. Rochon, persuadé que le spectre solaire ne s'étendait pas au delà de la portion que les couleurs rendent visible à l'œil, ne songea pas à placer son thermomètre au delà de la portion rouge. Herschel, plus clairvoyant ou plus heureux, soupçonna que le prisme avait pu réfracter des rayons invisibles; encouragé par l'augmentation continue de chaleur dans le passage du

violet au rouge, il mit le thermomètre un peu en dehors de cette dernière couleur ; cet essai fut couronné d'un plein succès ; la température s'éleva encore, et il fut constant qu'il existait là de nouveaux rayons que nous ne voyons pas, mais qui existent réellement, puisque leur présence se fait sentir. Le thermomètre d'Herschel montait encore quand il le plaçait à un demi-pouce au delà de la lumière visible; à un pouce et demi, il descendit un peu : on avait dépassé le point de chaleur maximum. Le même jour, par un temps superbe, il s'assura qu'aucun des rayons qui pourraient tomber au delà du violet n'avait ni la faculté d'éclairer ni la faculté de chauffer, et que ces deux facultés, confondues ensemble dans l'étendue ordinaire du spectre, cessaient là où se terminait le pinceau violet. Il restait un point important à déterminer, c'était le lieu du maximum de la faculté calorifique. Herschel, après une suite de tâtonnements, le fixe à un demi-pouce en dehors de la dernière limite des rayons rouges, et termine par cet admirable résumé de ses recherches : « Il y a des rayons venant du soleil qui sont moins réfrangibles qu'aucun de ceux qui affectent l'organe de la vue. Ils possèdent éminemment la faculté de produire la chaleur, mais ils n'éclairent point, et c'est là ce qui les a fait jusqu'à présent méconnaître. Je n'ai pas actuellement l'intention d'assigner l'angle de moindre réfrangibilité de ces rayons, il faudrait pour cela des expériences plus exactes, plus répétées et plus étendues; mais à la distance de 52 pouces du prisme, ces rayons invisibles possédaient encore une faculté calorifique considérable à un pouce et demi en dehors des rayons rouges. Je ne doute point qu'on ne puisse constater leur influence plus loin encore.... La faculté d'échauffer s'étend jusqu'aux dernières limites visibles des rayons violets, mais pas au delà; elle diminue à mesure que les rayons deviennent plus réfrangibles.... Le maximum de la faculté calorifique se trouve dans la région des rayons invisibles, et probablement au moins à un demi-pouce en dehors des derniers rayons visibles, lorsqu'ils sont projetés sur un plan horizontal.... Les rayons invisibles du soleil, dans leur état le moins réfrangible et fort au delà du maximum, possèdent encore une faculté calorifique au moins égale à celle des rayons rouges ; et, par conséquent, si nous pouvons juger de la cause par l'effet, les rayons invisibles du soleil surpassent probablement de beaucoup en nombre les rayons visibles.

» Si nous appelons *lumière* les rayons qui éclairentl es corps, et *chaleur rayonnante* ceux qui les réchauffent, on peut se demander si la lumière est essentiellement différente de la chaleur rayonnante? Je dirais, en réponse, que nous ne sommes pas autorisés par les règles de la philosophie à admettre deux causes de certains effets, quand une seule peut suffire. Un faisceau de chaleur rayonnante venant du soleil est composé de rayons différemment réfrangibles. L'étendue de leurs variations à cet égard, lorsqu'ils sont dispersés par le prisme, commence au pinceau violet, où ils sont le plus réfractés et où ils ont le moins d'efficacité. Nous les avons suivis et retrouvés dans toute l'étendue du spectre solaire ; nous avons trouvé qu'ils augmentaient en force calorifique à mesure que leur réfrangibilité était diminuée, jusqu'aux dernières limites du pinceau rouge. Mais ces deux propriétés ne cessaient pas à cette limite ; car nous les avons poursuivies fort au delà du spectre visible : elles montraient, d'une part, une énergie croissante ; de l'autre, une réfrangibilité successivement diminuée, jusqu'à un certain maximum de force calorifique. A partir de ce terme, quoique leur réfrangibilité continuât de diminuer, leur densité diminuant de même selon toute probabilité, le *spectre thermométrique*, si je puis l'appeler ainsi, décroît rapidement et devient bientôt insensible.

» Si c'est là une représentation fidèle des faits qui concernent la chaleur solaire, et j'en appelle ici à mes expériences, il est naturel de supposer que tels rayons solaires qui ont la réfrangibilité de ceux qui forment le spectre prismatique sont en rapport avec l'organe de la vue et occasionnent la sensation de la lumière et des couleurs, et que les autres rayons, étant arrêtés par les membranes et les humeurs de l'œil, agissent sur cet organe comme ils le font sur tout le reste du corps, en y faisant naître la sensation de la chaleur... » Il avait dit ailleurs : « Si nous admettons, ce qui est extrêmement probable, savoir : que les organes de la vue sont adaptés exclusivement à des particules qui ont un *momentum* déterminé, cela expliquerait pourquoi le maximum d'illumination pourrait tomber au milieu des rayons réfrangibles, parce que ceux qui ont un *momentum* plus ou moins grand sont, selon toute apparence, également inutiles à la vision, tandis qu'il n'y a peut-être pas de limite possible dans le *momentum* des particules de la chaleur rayonnante. »

Herschel admit donc d'abord le principe de l'identité essentielle entre les radiations lumineuses et calorifiques. En rendant compte de ces recherches, le savant directeur de la *Bibliothèque universelle* combattit cette opinion, défendue aujourd'hui, comme nous le verrons, par M. Melloni. Il disait : « Nous considérerions plus volontiers l'émanation totale, que nous appellerions le flux solaire, comme composée de deux éléments ordinairement réunis et occasionnant alors sur nos organes la double sensation de lumière et de chaleur, mais séparables et quelquefois séparés, et faisant naître alors l'une ou l'autre des deux sensations tout-à-fait distinctes. » Au reste, comme nous allons le voir, les expériences subséquentes d'Herschel modifièrent sa première manière de voir. Il démontra d'abord que le spectre des rayons calorifiques occupe un beaucoup plus grand espace que ne le fait celui des rayons lumineux, et constata que les rayons calorifiques possédaient eux-mêmes la propriété du rapport constant entre les sinus d'incidence et de réfraction. Il observa que la disposition des trois prismes qui corrige la différence de réfrangibilité des rayons lumineux et produit un spectre chromatique détruit aussi la dispersion des rayons chauds, de telle sorte que le thermomètre placé au bord de ce spectre n'annonce pas plus de chaleur qu'ailleurs. Il vit nettement que le foyer de chaleur était placé à une distance de la lentille autre que le foyer de lumière. Enfin, en faisant passer à la fois les deux émanations, lumineuse et calorifique, à travers d'un très grand nombre de substances, il étudia attentivement les effets d'absorption produits, et constata des différences énormes. La pensée de l'identité entre les deux radiations s'évanouit alors tout à coup. « Ce fait, dit-il, que l'acte d'intercepter l'une des deux émanations n'entraîne pas nécessairement la suppression de l'autre, et que, sous ce rapport, la chaleur et la lumière sont indépendantes l'une de l'autre, prouve que les rayons qui les produisent sont essentiellement différents. »

Ces expériences curieuses et tout-à-fait imprévues, par lesquelles le grand Herschel mit en évidence les différences tranchées qui existent entre les rayons calorifiques et les rayons lumineux, et distinguent même les uns des autres les rayons lumineux ou obscurs empruntés à diverses sources, ont été répétées depuis par un très grand nombre de physiciens. D'accord au fond, leurs recherches

diffèrent quant à la position du maximum de température ; la question de l'identité demandait aussi une solution plus complète : il était réservé à M. Melloni de résoudre de la manière la plus satisfaisante ces deux grandes difficultés. Nous reproduirons textuellement son mémoire, en complétant ainsi l'étude des rayons calorifiques du spectre.

ESSAIS D'UNE ANALYSE CALORIFIQUE DU SPECTRE SOLAIRE PAR M. MELLONI.

Des rapports de température entre les rayons lumineux. — « On connaît les vicissitudes qu'ont éprouvées les notions admises par les physiciens sur la distribution de la chaleur dans le spectre solaire. L'analyse de Newton fit penser d'abord que les rayons diversement colorés et réfrangibles dont la lumière blanche se compose possédaient des degrés de chaleur proportionnels à leurs intensités ou *forces éclairantes*. Cette manière de voir parut confirmée par les expériences de Landriani, Rochon, Sennebier, qui placèrent la plus haute température dans la bande la plus éclairée du spectre, c'est-à-dire dans le jaune ou le commencement de l'orangé. L'opinion changea lorsque Herschel fit paraître ses belles découvertes héliothermiques, d'où il déduisit : 1° qu'il existait des rayons calorifiques obscurs au delà de l'extrémité rouge ou inférieure du spectre solaire ; 2° que le *maximum* de température se trouvait parmi ces rayons tout près de ladite extrémité inférieure. Malus et Bérard répétèrent plus tard les expériences d'Herschel en présence de Berthollet, et confirmèrent les faits observés par le célèbre astronome allemand en ce qui regarde l'existence de la chaleur moins réfrangible que le rouge ; mais ils ne tombèrent pas d'accord avec lui sur la position du maximum de température, qui leur parut décidément sur la limite du spectre et non dans l'espace obscur adjacent. Leslie, Englefield, Wünsch, Ritter, Davy, Rutland, entreprirent aussi des recherches analogues, et vinrent appuyer tantôt l'un tantôt l'autre de ces résultats.

» Il était difficile de croire que les expériences d'un si grand nombre de physiciens si habiles fussent entachées d'erreur ; il était difficile de supposer, en d'autres termes, que chacun d'eux n'eût pas

réellement obtenu le résultat annoncé. D'où provenaient donc les différences? Seebeck montra qu'elles étaient dues à l'action des diverses substances diaphanes qui formaient le prisme avec lequel on décomposait le rayon solaire. Effectivement, en étudiant la marche comparative du thermomètre sur des spectres fournis par des prismes d'eau, d'acide sulfurique, d'alcool, de crown-glass et de flint-glass, M. Seebeck observa que le *maximum* se trouvait sur le jaune pour le prisme d'eau; sur l'orangé pour l'alcool et l'acide sulfurique; dans la position voulue par Malus et Bérard, en se servant d'un prisme de crown-glass ou de certaines espèces de flint-glass, et dans la zone indiquée par les expériences d'Herschel si l'on employait un prisme de flint-glass anglais. Maintenant, on demandera pourquoi des substances incolores ne produisant aucune variation dans les intensités relatives des éléments lumineux, donnent de si grandes différences à l'égard de la chaleur?

» Voilà précisément la question que je tâchai de résoudre, il y a une douzaine d'années, par une série d'expériences, dont les premiers résultats furent communiqués à l'Académie des Sciences de Paris par M. Arago, et imprimés ensuite dans les *Annales de Physique et de Chimie pour l'année* 1832. Ayant pris les températures des principales bandes colorées d'un spectre fourni par un prisme de crown-glass, et vérifié que le *maximum* de température y était à l'extrémité du rouge, je continuai à explorer, au moyen du thermo-multiplicateur rectiligne, la distribution de la chaleur au delà de cette extrémité, et je notai là six bandes inférieures de chaleur obscure *isothermes* aux six couleurs supérieures du spectre. Puis j'interposai une couche d'eau de deux lignes d'épaisseur, renfermée entre deux lames parallèles de verre, de manière que les rayons émergents du prisme fussent transmis au travers de cette couche dans une direction qui ne s'écartât pas beaucoup de la perpendiculaire, et je mesurai de nouveau les températures des bandes obscures et des bandes lumineuses. Je les trouvai tellement altérées que quelques unes avaient été totalement détruites; d'autres s'étaient affaiblies d'une quantité plus ou moins grande; on en trouvait, enfin, qui n'avaient subi qu'une diminution à peine appréciable. La zone qui avait éprouvé la destruction totale était la moins réfrangible, c'est-à-dire la bande isotherme du violet; de là la perte devenait de moins en moins pro-

noncée, à mesure que l'on approchait de la bande rouge, l'orangé et une partie du jaune ; après quoi les rapports des températures initiales se conservaient à peu près constants jusqu'à la limite violette supérieure.

» Cette action inégale, exercée par l'eau sur les diverses bandes du spectre, devait évidemment déplacer le maximum de température et le faire marcher vers les rayons plus réfractés, puisque les bandes les moins réfrangibles, que nous appelons, pour abréger, *bandes inférieures*, éprouvaient une perte beaucoup plus forte que les bandes les plus réfrangibles ou supérieures. C'est aussi ce qui advint, car le *maximum* de chaleur passa de la dernière limite du rouge à la partie supérieure de l'orangé. Cette expérience prouvait incontestablement que *la chaleur répandue dans les différentes parties du spectre solaire n'est pas un agent homogène.*

» Frappé de la portée que me paraissait avoir ce fait nouveau relativement aux flux de chaleur rayonnante, j'entrepris des recherches assez étendues sur les propriétés des radiations calorifiques en général, et je fus conduit ainsi à une découverte qui changea complètement les idées reçues sur la nature des rayons de chaleur obscure. Je veux parler du pouvoir que possède le sel gemme de transmettre ces rayons dans la même proportion que la lumière calorifique ou la chaleur lumineuse, quelles que soient, d'ailleurs, la qualité ou la température des sources rayonnantes.

» Dans toutes les expériences analogues exécutées jusqu'alors sur des corps diaphanes incolores solides ou liquides, on avait trouvé la quantité de chaleur immédiatement transmise d'autant plus faible que la température de la source était moins élevée. Cependant, cette quantité de chaleur immédiatement transmise ne commençait à devenir bien appréciable qu'avec l'apparition de la lumière ; de là l'opinion que la chaleur obscure se transformait graduellement en radiation lumineuse, que l'on croyait de toute autre nature. On comprend que le seul fait d'*une substance diaphane incolore tel que le sel gemme, transmettant également bien toute sorte de rayons lumineux ou obscurs*, devait renverser de fond en comble ces hypothèses et suggérer une manière de voir plus conforme à la vérité.

» Dans le cours de mes recherches, je me convainquis, en effet, que l'*hétérogénéité observée chez la chaleur solaire existait aussi chez*

les flux de chaleur provenant des sources terrestres, lumineuses ou obscures, que je trouvais composées d'éléments divers, tantôt coexistants, tantôt séparés, et totalement analogues aux différents rayons colorés qui composent la lumière. Ces éléments étaient tous transmis abondamment, et en proportions à peu près égales, par les couches très minces de verre, d'eau, d'alcool, et traversaient en proportions très différentes les couches épaisses de ces mêmes corps. De plus, *des quantités égales de chaleur, émergentes des couches de diverse nature, passaient en quantité si différente par une lame donnée d'une substance diaphane incolore, que certains rayons étaient entièrement transmis, d'autres complètement absorbés.* En combinant ces données avec la notion de *la transmission constante du sel gemme pour toute sorte de rayonnements, directs ou modifiés, pendant leur passage au travers des milieux diathermiques,* je crus pouvoir en conclure hardiment que *le verre, l'eau, le cristal de roche, et généralement tous les corps diaphanes et incolores, étaient thermocroïques, c'est-à-dire qu'ils agissaient sur les rayons calorifiques.*

» Alors la question de la distribution des températures dans le spectre solaire se présenta sous son véritable point de vue. On trouverait certainement absurde le procédé de celui qui voudrait comparer entre elles les intensités relatives des éléments lumineux séparés, au moyen des différences de diffraction d'un prisme de verre fortement coloré en bleu par l'oxyde de cobalt ou doué de toute autre coloration énergique. C'était tout juste l'œuvre qu'on avait accomplie jusqu'alors en étudiant la distribution de la chaleur sur les spectres donnés par les prismes ordinaires de crown-glass, de flint, d'eau, d'alcool, et autres substances incolores. Pour avoir les véritables températures des zones prismatiques, lumineuses ou obscures, il fallait évidemment décomposer le rayon solaire avec le prisme de sel gemme, qui, étant également perméable à toute espèce de radiation calorifique, constituait, pour ne pas sortir de notre comparaison, *le verre blanc de la chaleur*. Je ne manquai pas de faire cette expérience capitale, et je trouvai que le maximum de température, dans ce spectre normal, existait réellement dans l'espace obscur, non pas au contact de la limite rouge, comme l'avait observé Herschel père avec son prisme de flint-glass, mais tout-à-fait détaché des couleurs, à

une *distance moyenne* égale à celle qui existe, en sens contraire, entre le rouge et le jaune.

» Je dis que la décomposition des rayonnements calorifiques effectuée au moyen d'un prisme de verre, d'eau, d'alcool ou d'autres manières analogues, est entièrement faussée par la force absorbante du prisme, qui, éteignant certains éléments de chaleur, transmet le reste du flux rayonnant dans un état de composition tout différent de celui qui existait avant l'incidence. Cette proposition, dont l'exactitude ne saurait laisser une ombre de doute dans l'esprit des personnes qui connaissent l'ensemble de mes expériences sur la *transmission calorifique*, peut se démontrer directement de la manière suivante :

» Décomposons d'abord le rayon solaire par le prisme de sel gemme, et interposons ensuite, sur le passage de la radiation prismatique, une couche de matière limpide et incolore. D'après nos idées sur l'hétérogénéité des éléments qui composent les flux de chaleur rayonnante et sur l'absorption élective exercée par la substance interposée, il est clair que nous devrons obtenir des effets semblables à ceux que l'on avait observés sur les spectres fournis par des prismes de verre, d'eau et autres substances analogues, avant la connaissance du pouvoir diathermique constant du sel gemme. Effectivement, je fis passer mon *spectre calorifique normal* par une plaque assez épaisse de flint-glass : le *maximum* de température se rapprocha un peu de la bande rouge, en se maintenant toujours dans l'espace obscur. Je remplaçai le flint par du verre ordinaire : le *maximum* pénétra dans le rouge ; je substituai enfin l'eau à l'alcool, et le *maximum* passa au commencement du jaune. Or, à cause de la limpidité des milieux traversés, les couleurs n'éprouvaient aucune altération sensible, et le *maximum* de lumière restait toujours invariablement fixé au commencement du jaune.

» Ainsi, les bandes inférieures du spectre peuvent conserver les mêmes rapports d'intensité lumineuse et perdre les relations qui existent entre leurs températures ; les éléments calorifiques ne suivent donc pas le sort des éléments lumineux correspondants ; donc la lumière et la chaleur sont deux agents différents, ou deux modifications essentiellement distinctes du même agent.

» Cette argumentation contre le *principe d'identité* serait sans réplique, si on était bien certain qu'à chaque point du spectre corres-

pond un rayon doué d'un seul degré de réfrangibilité, et que plusieurs rayons d'espèces différentes ne s'y trouvent pas superposés. Or, la séparation complète, par voie de réfraction, des éléments qui composent le rayon solaire, est une limite que nous ne pouvons jamais atteindre, mathématiquement parlant. Néanmoins, si on se place dans des circonstances favorables, il n'y a nul doute qu'on ne parvienne à séparer assez les rayons pour que chaque ligne ou bande mince du spectre solaire soit sensiblement formée d'éléments doués d'un seul degré de réfrangibilité. Newton en a donné de beaux exemples dans ses admirables expériences sur la composition de la lumière. Mais les physiciens qui ont analysé la chaleur solaire ont-ils réellement opéré sur des rayons homogènes dans chaque bande du spectre ? La question est vitale pour le principe de l'identité ; car si le rouge, l'orangé et le jaune, au lieu d'être purs, contenaient des rayons calorifiques obscurs, il serait possible que les changements de température observés dérivassent de l'absorption plus ou moins grande exercée sur ces derniers rayons, et non pas sur ceux qui constituent les couleurs ; et que, par conséquent, malgré les apparences contraires, les actions calorifiques des bandes inférieures fussent réellement inattaquables par les substances diaphanes incolores, comme cela doit être effectivement, si l'on admet que la chaleur et la lumière dérivent des mêmes radiations élémentaires dans toute l'étendue des couleurs newtoniennes. Nous allons voir que les choses se passent réellement ainsi. Les résultats obtenus par Seebeck et les physiciens qui l'ont précédé ou suivi, relativement à la position différente que le *maximum* de température occupe dans le spectre solaire, ne sont pas simples, mais composés. Ce *maximum* fut trouvé tantôt dans le rouge, tantôt dans l'orangé, et tantôt dans le jaune, parce que les diverses substances incolores qui constituaient le prisme absorbaient, en proportion plus ou moins grande, certains rayons de chaleur obscure mêlés aux bandes inférieures du spectre par l'effet de la méthode défectueuse qui était employée.

» Pour avoir une première démonstration de ce principe, recouvrez la face antérieure de l'angle réfringent d'un prisme de verre ordinaire avec une couche opaque d'encre de Chine que vous laisserez bien dessécher ; partagez ensuite cette face en trois parties égales, dans le sens normal à l'axe ; enlevez avec un canif toute la partie mi-

toyenne de la couche opaque, et ôtez-en une seule bandelette extrême, de quelques millimètres de largeur, aux bords alternes des deux parties latérales, en sorte que la bandelette de la partie droite étant en contact avec l'arête opposée, et que l'ensemble de la surface découverte représente une espèce de Z dont la grosse branche du milieu coupe à angle droit les deux minces lignes parallèles qui la terminent en sens contraire.

» On conçoit que le rayon solaire émergent du prisme ainsi préparé engendrera trois spectres, placés bout à bout, dans le sens *de l'axe* : l'intermédiaire vif et brillant dû à la position mitoyenne *libre* du prisme ; les deux autres, plus pâles, provenant des deux petites bandes latérales. On conçoit aussi que le grand spectre central aura ses deux limites de plus grande et de plus petite réfrangibilité, *affleurées*, pour ainsi dire, avec l'une des limites homologues et opposées des deux petits spectres. Que si son extrémité rouge se trouve sur la même ligne que le rouge extrême du petit spectre de droite, par exemple, son extrémité violette sera nécessairement sur la même ligne que le violet extrême du spectre gauche. Quant aux deux autres limites du petit spectre, on ne les verra nullement affleurées avec leurs homologues du grand spectre, mais distantes, séparées, et d'autant plus que la différence de largeur entre les petites bandes et la face qui donne le spectre central sera plus grande.

» Dans l'une de mes observations, faite sur un prisme ayant un angle réfringent de 61° et les bandelettes latérales de 5 millimètres, j'avais, à la distance de deux mètres, la limite rouge du petit spectre gauche à la hauteur du jaune supérieur du spectre central, et la limite violette du petit spectre droit à la hauteur qu'affectait le bleu dans ledit spectre du centre. Un prisme d'eau dont l'angle réfringent était de 79°, préparé de la même manière, présentait des résultats tout-à fait analogues. Dans l'un et l'autre cas, la limite rouge du spectre gauche passait sur l'alignement du vert, si on examinait ces trois images à un mètre de distance.

» Décomposons, par la pensée, la portion mitoyenne et entièrement découverte du prisme en une série d'éléments longitudinaux de même largeur que les bandelettes extrêmes des deux portions latérales. Il est évident que chacun de ces éléments produira une image réfractée parfaitement semblable à celles qui sont formées par les-

dites bandelettes latérales, et que les deux images extrêmes de cette série se trouveront aux mêmes niveaux que les deux petits spectres. Donc le rouge et le violet, que nous voyons à côté du jaune et du bleu appartenant au spectre central, *existent aussi dans leur intérieur*.

» Cet argument sur la présence d'une couleur hétérogène est irréfragable : excepté les deux teintes extrêmes, on peut l'appliquer à toutes les nuances qui composent le spectre brillant du centre, nuances qui, au lieu d'être pures, contiennent, par conséquent, des teintes fort hétérogènes. Il y a plus : au-dessus de la limite rouge du spectre déterminée par Newton, vient se placer la radiation obscure d'Herschel, qui, d'après mes expériences, est composée de différentes quantités de chaleur. Or, nous venons de prouver qu'à la partie supérieure du jaune, il existe une de ces limites rouges newtoniennes ; donc le jaune, l'orangé et le rouge du spectre produit, à un ou deux mètres de distance, par un prisme ordinaire entièrement plongé dans le rayonnement solaire, contiennent plusieurs espèces de chaleur obscure.

» Que ce même mélange de chaleur et de lumière obscure eût lieu dans les expériences des physiciens qui ont analysé la chaleur obscure, cela devient de toute évidence, lorsqu'on examine les circonstances sous lesquelles de semblables expériences ont été accomplies, puisque les dimensions des prismes et des faisceaux incidents, les ouvertures des angles réfringents, les distances auxquelles on plaçait les thermomètres approchaient tout-à-fait de celles que nous venons de prendre pour exemple. Dans presque tous les cas, l'une ou l'autre des données les plus influentes par rapport à l'objection que nous venons de soulever, c'est-à-dire *l'ampleur du faisceau incident et la petite distance du thermomètre au prisme*, était même beaucoup plus exagérée. Ainsi les mesures thermométriques de M. Bérard ont été prises à 0^{m},5 de distance du prisme qui, avec un angle réfringent de 60° environ, recevait un faisceau de lumière couvrant 15 à 20 millimètres de sa face antérieure.

» Seebeck a fait ses expériences sur les prismes liquides avec des thermomètres éloignés ordinairement d'un à deux mètres du prisme ; mais *la face antérieure de l'angle réfringent, qui plongeait totalement dans les rayons solaires, variait entre* 80 *et* 110 *millimètres.*

» Une seconde cause d'erreur dans la position du *maximum*, erreur qui ne paraît pas avoir été aperçue jusqu'ici, peut dériver des appareils employés à mesurer le rayonnement calorifique.

» Aucun des nombreux expérimentateurs qui se sont occupés de la détermination des températures dans le spectre solaire, ne semble s'être douté qu'en faisant passer successivement le thermomètre ou le thermoscope par toutes les gradations du spectre, et en supposant que l'instrument ait atteint sa position d'équilibre à chaque station, *le liquide puisse se tenir plus bas étant sur la ligne du maximum de chaleur, que hors de cette ligne;* et que, par conséquent, il y a des circonstances où les indications d'un thermomètre plongé successivement dans les différentes zones prismatiques, conduisent à des conséquences tout-à-fait erronées.

» Pour démontrer la possibilité de ces indications fautives du thermomètre, remarquons d'abord qu'en partant de la ligne où le *maximum* de chaleur est placé, la température ne diminue pas également de l'un et de l'autre côté du spectre solaire. Le décroissement se fait toujours avec une lenteur beaucoup plus grande en allant vers le violet que du côté opposé : pour en donner une idée, il suffira de faire observer que la distance de la première limite étant égale à l'unité, celle de l'autre limite n'arrive pas à 1/3 et se réduit même dans plusieurs cas à 1/5 ou 1/6.

» Cela posé, imaginons le spectre solaire divisé en une série de petites bandes parallèles entre elles et à l'axe du prisme, ayant chacune une largeur de deux millimètres, et représentons les quantités de chaleur contenues dans les bandes qui sont rapprochées du *maximum* par les chiffres suivants :

Numéros d'ordre . . .	1	2	3	4	5	6	7.
Intensités calorifiques .	44	46	48	50	42	34	28.

» Supposons maintenant que l'on prenne un thermomètre ayant un réservoir dont le diamètre soit égal à six millimètres. Il est clair que cet instrument, plongé dans les rayons du spectre, ne pourra guère indiquer la température de chacune de nos bandes élémentaires, mais seulement la somme de température appartenant à plusieurs bandes consécutives ; car la largeur d'une bande est de deux millimètres et celle du thermomètre de six ; en sorte que le commencement d'une de ces bandes élémentaires du spectre coïncidant exactement

avec le commencement du réservoir thermométrique, celui-ci devra nécessairement couvrir l'espace occupé par trois divisions.

» Supposons, enfin, que le thermomètre parcoure le spectre entier, de manière que son réservoir couvre successivement, trois par trois, les bandes consécutives. Pour connaître l'action calorifique éprouvée chaque fois par l'instrument, et savoir en même temps les rayons du spectre auxquels l'observateur attribuera la température marquée par le thermomètre, il suffit de grouper trois par trois les valeurs des diverses bandes élémentaires, en sorte que les chiffres correspondants aux bandes des rayons qui frappent des deux côtés du thermomètre, viennent se placer au-dessous des rayons de la bande centrale. La somme de ces trois valeurs indiquera alors non-seulement l'intensité de l'action calorifique observée, mais encore la position qui lui est attribuée par l'observateur. En effectuant les diverses opérations, on aura le tableau qui suit :

Numéros d'ordre.	1	2	3	4	5	6	7
Bandes élémentaires du spectre.	44	46	48	50	42	34	28
		44	46	48	50	42	
		48	50	42	34	28	
Positions et températures du thermomètre. . . .		138	144	140	126	104.	

» Ainsi, le thermomètre marque le *maximum* au n° 3, et le tableau précédent nous dit que la véritable position du *maximum* est au n° 4. *L'indication peut donc être fausse*, comme nous l'avions annoncé, et cela parce que le thermomètre, au lieu de donner la température individuelle de chaque rayon élémentaire, embrasse celle d'un certain nombre de ces rayons; en sorte que la probabilité d'erreur croît évidemment avec le diamètre du réservoir thermométrique

» Maintenant l'erreur a-t-elle eu lieu réellement dans les expériences qui ont servi à l'analyse de la chaleur solaire? Pour répondre complétement à cette question, il faudrait connaître d'abord les dimensions précises des corps thermoscopiques employés, et tous les auteurs ne les indiquent pas. Nous savons seulement que M. Bérard s'est servi de thermomètres à mercure dont le réservoir cylindrique

avait une largeur de 4 millimètres, et que Seebeck employait des thermomètres à air qui portaient une boule d'un demi-pouce, ou 14 millimètres environ, de diamètre. Il est présumable que les dimensions des instruments adoptés par les autres observateurs étaient comprises entre ces deux limites. Quoi qu'il en soit, voici comment je me suis assuré que l'erreur que je viens de signaler se produit effectivement, au moins dans certains spectres, avec des thermoscopes d'un volume encore moindre que celui qu'a employé Seebeck.

» Une pile thermo-électrique de 25 couples, formant un *carré* de 10 millimètres de côté, et une autre de 12 couples, disposées sur une seule rangée ayant 2 millimètres de largeur, munies toutes les deux de boîtes métalliques à coulisses qui permettaient d'introduire dans l'intérieur des faisceaux plus ou moins larges de rayons, furent promenées successivement, à la distance d'un mètre et deux décimètres, sur les différentes parties d'un spectre fourni par un prisme d'eau dont l'angle réfringent avait 79° d'ouverture et la portion active de la face antérieure 5 millimètres de largeur. Un excellent galvanomètre, mis successivement en communication avec deux piles, donna les résultats suivants :

Diamètre du corps thermoscopique.		Intensité du rayonnement calorifique.				
		A	B	C	D	E
Millim.	10	21,5	26,8	27,5	25,6	22,2
—	5	16,7	21,8	22,4	19,7	16,9
—	2	21,2	25,4	24,5	20,1	14,8
—	1	14,1	16,8	16,2	13,5	9,8
—	0,5	9,2	11,1	10,6	9,1	6,4

» Les lettres placées en tête des cinq dernières colonnes se rapportent aux bandes lumineuses et obscures qui paraissent sur les couleurs prismatiques, lorsqu'on les observe à travers une de ces lames de verre coloré en bleu par l'oxyde cobalt, si abondamment répandues aujourd'hui dans le commerce. Il est bien connu, en effet, que le spectre se montre alors composé de bandes colorées alternativement obscures et lumineuses.

» La série de ces bandes dans les circonstances que nous avons adoptées, c'est-à-dire avec un prisme exposé, près de l'ouverture de la

chambre obscure, à l'action directe des rayons solaires, commence par une zone rouge assez vive, à laquelle succède une zone obscure rougeâtre plus étroite ; puis vient une bande jaune large et brillante, et, enfin, une seconde zone obscure verdâtre plus légère et plus étroite que la précédente ; viennent ensuite le bleu, l'indigo et le violet, qui conservent à peu près les mêmes rapports qu'ils affectent dans le spectre vu sans l'interposition du verre coloré.

» Les largeurs relatives des quatre zones obscures et lumineuses changent avec l'ampleur du prisme et le pouvoir dispersif de la substance qui le compose ; mais leur ordre de succession est toujours le même, et elles répondent constamment aux mêmes teintes du spectre : voilà pourquoi on peut les employer fort utilement comme points de repère.

» Un autre avantage qui résulte de la vision à travers le verre bleu, c'est que l'on arrive par ce moyen à une détermination exacte de la limite rouge. Lorsqu'on regarde l'image du spectre qui vient se peindre sur une surface donnée, on estime toujours la limite inférieure beaucoup plus élevée, c'est-à-dire qu'on donne toujours à la teinte rouge du spectre une étendue beaucoup plus restreinte qu'elle n'occupe réellement ; et on est tout étonné de le voir s'accroître, en empiétant sur l'espace obscur d'une quantité fort considérable, quand on l'examine avec le verre bleu. Cet effet est dû évidemment à la grande absorption de lumière que le verre bleu produit dans la partie centrale du spectre, et surtout dans l'espace environnant, qui, malgré les précautions prises pour opérer dans l'obscurité, se trouve toujours trop éclairé par la lumière diffuse ; car la pupille se dilate en vertu d'une semblable absorption lumineuse, et l'œil devient beaucoup plus sensible à l'action du rouge sombre qui termine l'extrémité inférieure du spectre. Peut-être la teinte bleue, qui, dans la vision à travers le verre coloré, vient se placer tout à côté du rouge prismatique, contribue-t-elle aussi, par la loi connue du contraste, à relever plus nettement la limite inférieure de la bande rouge. Cette limite est représentée par la lettre A dans le tableau qui précède ; les autres lettres indiquent les quatre bandes principales produites par l'interposition du verre bleu. Quant aux correspondances de ces points de repère avec les teintes du spectre, on doit retenir que :

A correspond à l'extrême limite rouge du spectre ;

B correspond au milieu du rouge;
C — au commencement de l'orangé;
D — au milieu du jaune;
E — au milieu du vert.

» Pour placer le centre de la pile dans ces diverses positions, on adapte au couvercle de son enveloppe un carton blanc découpé, sur lequel on a tracé de chaque côté une ligne noire qui indique le centre de l'instrument. Les bandes colorées produites par l'interposition du verre bleu se distinguent si nettement sur le carton, que l'on peut atteindre par ce moyen la plus grande précision dans les *mesures*; et la preuve en est fournie par l'instrument thermoscopique lui-même, qui donne toujours, à très peu près, la même indication lorsqu'on répète plusieurs fois de suite la même expérience. Trois observations suffisent ordinairement pour obtenir des résultats bien comparables. Il est clair que ces observations doivent être liées ensemble par séries *ascendantes* et *descendantes*, et exécutées à des époques assez rapprochées, comme on peut toujours le faire fort heureusement, grâce à la sensibilité et à la promptitude des indications du thermo-multiplicateur. Les trois nombres de la même zone, tirés des deux séries ascendante et descendante, ou *vice versâ*, sont déjà fort comparables quand on opère deux heures avant ou après midi; cependant, toutes les expériences de comparaison ont été faites de onze heures à une heure, pendant les belles journées de juin, juillet, août, et sous le ciel si pur de Naples. Je fixai le prisme près d'une ouverture circulaire d'un décimètre environ de diamètre, pratiquée dans le volet d'une chambre obscure, en sorte que les rayons solaires vinssent frapper en plein sur la partie découverte de sa face antérieure, l'axe du prisme étant horizontal, et l'angle réfringent tourné de manière à relever le rayon réfracté et à le faire sortir sous un angle égal à celui d'incidence. La pile thermo-électrique, munie de son carton blanc et posée sur un support éloigné de 1^{m} 20 du prisme, était portée successivement dans les cinq positions par un mouvement à vis qui permettait de l'élever et de la fixer à la hauteur voulue.

» Voyons maintenant les conséquences de notre tableau. Les deux premières séries transversales portent en C la plus grande chaleur observée, tandis que les trois dernières l'ont en B. Ainsi, dans certaines circonstances, *la position apparente du maximum varie réel-*

lement par le seul fait de la différence de volume du corps thermoscopique.

» Si l'on représente graphiquement les résultats de nos cinq séries, il est facile de reconnaître que le *maximum* de chaleur, qui, dans la première série, était assez voisin de C, s'en écarte davantage et se rapproche de B dans la seconde. Quant aux trois dernières séries, le *maximum* ne varie pas et se maintient constamment à une petite distance de B. Tout cela se déduit d'ailleurs très aisément de la simple comparaison des nombres contenus dans le tableau.

» Le cas que nous venons de considérer est un des plus propres à montrer l'influence exercée par le diamètre du corps thermoscopique sur la position apparente du *maximum* de température du spectre solaire. Cette influence cesse lorsque la pile est réduite à deux millimètres de largeur, car toutes les dimensions inférieures donnent le même résultat. Il s'ensuit que l'on ne saurait plus être induit en erreur lorsque la dimension du corps thermoscopique, selon le sens parallèle à l'axe du prisme, ne surpasse pas deux millimètres. Voilà pourquoi presque toutes les expériences que nous rapporterons par la suite ont été exécutées avec un thermo-multiplicateur à pile linéaire, ne surpassant jamais un millimètre d'ouverture, lorsque la distanceétait de douze décimètres.

» Je n'ai pas jugé convenable d'opérer à de plus grandes distances, parce que désirant me servir des rayons solaires directement réfractés sans l'intermédiaire d'aucune réflexion, pour ne point affaiblir leur action calorifique, il ne fallait pas s'écarter beaucoup du prisme, afin d'éviter la trop grande rapidité du transport des zones prismatiques dû à la rotation diurne du globe. A ce propos, il est important de remarquer que l'heure des observations, la forme de l'instrument thermoscopique et la promptitude de ses indications conspiraient toutes à rendre sensiblement nulle, dans mes expériences, l'influence du mouvement propre de la terre. En effet, si on observe seulement *l'arc d'impulsion* décrit par l'index de l'instrument lors de l'immersion de la pile dans chaque zone du spectre, sans attendre son équilibre stable, on arrive au but dans une fraction de minute, et pendant cet intervalle de temps le transport du rayon réfracté est bien faible à douze décimètres de distance. De plus, à cause de l'heure rapprochée du midi, le transport selon la verticale



devient presque insensible, et la composante horizontale n'a aucune influence nuisible, parce que le prisme étant fixé horizontalement et étant beaucoup plus long que la pile, celle-ci, disposée parallèlement aux bandes colorées, reste toujours plongée dans la même zone, dont les diverses parties, qui sont toutes douées de la même intensité, passent successivement par son ouverture.

» Quelquefois l'impossibilité de me procurer certains prismes d'une longueur convenable m'a forcé d'opérer à une distance du prisme moindre qu'un mètre. Mais alors j'ai eu soin de rétrécir dans la même proportion la fente de la pile, afin de la tenir à l'abri de l'erreur due à la largeur thermoscopique ; car il est évident que l'influence de ladite dimension est exactement proportionnelle à l'éloignement du prisme, en sorte que l'expérience nous ayant prouvé qu'à la distance d'un mètre et deux décimètres, on peut employer, sans crainte d'altérer en apparence la position du *maximum*, un corps thermoscopique d'un ou deux millimètres de largeur, si on veut éviter la même cause d'erreur, pour une distance de six décimètres, par exemple, il faudra donner à la pile la moitié de cette ouverture ; pour quatre décimètres, il faudrait réduire l'ouverture à un tiers de millimètre, et ainsi de suite.

» Nous possédons maintenant toutes les données nécessaires à l'étude expérimentale de l'influence qu'exerce la largeur de la face antérieure du prisme sur la distribution de la chaleur dans le spectre solaire.

» Pour avoir des surfaces réfringentes de différentes largeurs, je me suis presque toujours servi de l'artifice décrit plus haut, qui consiste à couvrir d'encre de Chine la face antérieure d'un prisme fort large, et à en ôter ensuite une portion déterminée. Quelquefois j'ai aussi adapté à la face antérieure du prisme une garniture à coulisses qui permettait de faire arriver sur la surface réfringente un faisceau de rayons d'une largeur donnée. Dans l'un et l'autre cas, le prisme était placé tout près de l'ouverture, entièrement plongé dans la lumière solaire, comme je l'ai dit tantôt, et il faisait avec les rayons incidents un angle égal à celui de l'émergence.

» Voici les données que m'ont fournies trois séries d'expériences sur différents spectres, développés par un même prisme d'eau renfermée entre trois lames de verre de Saint-Gobain, réunies entre elles

sous des angles de 40°, 60° et 79° ; l'angle réfringent employé a toujours été celui de 79°, construit exprès pour augmenter autant que possible le faible pouvoir dispersif de l'eau :

Largeur de la face antérieure du prisme.		Intensité du rayonnement calorifique.				
—		A	B	C	D	E
Millim.	2,5	9,7	10,4	9,5	8,7	5,6
—	5	14,1	16,8	16,2	13,5	9,8
—	15	17,5	26,0	29,8	30,8	29,1

» Il suffit de jeter un coup d'œil sur ce tableau pour s'apercevoir que la distribution des températures est fort différente dans les trois spectres. Le *maximum* qui se trouve entre A et B sur le premier spectre, passe entre B et C dans le second, et entre C et D dans le troisième, c'est-à-dire que *la ligne de la plus haute température se transporte graduellement du rouge au jaune, à mesure que l'on forme le spectre avec des prismes plus larges.*

» Après les considérations que nous avons exposées sur les zones élémentaires du prisme, il sera facile de comprendre la cause de ce transport. En effet, chaque élément longitudinal de la surface antérieure de l'angle réfringent donne un spectre composé de rayons calorifiques obscurs et de rayons calorifiques lumineux. Supposons que les intensités des premiers soient représentés par 0, 0′, 0″, 0‴, 0⁗, etc., et celles des secondes par *l′*, *l″*, *l‴*, etc. Considérons d'abord le *spectre calorifique normal*, c'est-à-dire le spectre calorifique développé par le sel gemme, où le *maximum* a lieu, comme on sait, dans l'espace obscur. Supposons, pour fixer les idées, que cet espace ne contienne que cinq zones élémentaires, et que le *maximum* soit sur la troisième. Les températures des diverses bandes lumineuses et obscures résultant de la réfraction d'un seul élément du prisme seront exprimées par la série :

$$0,\ 0',\ 0'',\ 0''',\ 0'''',\ l,\ l',\ l'',\ l''',\ \text{etc.}$$

où les valeurs des termes iront en augmentant depuis 0 jusqu'à 0″, et diminueront ensuite jusqu'à l'extinction totale du rayonnement calorifique.

» Cela posé, si on laisse agir sur la lumière solaire un d'abord, puis

deux, puis trois éléments prismatiques, et ainsi de suite, en partant toujours de l'arête de l'angle réfringent et en augmentant graduellement la portion active du prisme, on obtiendra des spectres de plus en plus intenses, où les températures des bandes élémentaires seront exprimées par les séries suivantes :

Succession des spectres.	Distribution des températures.							
	CHALEUR OBSCURE.					CHALEUR LUMINEUSE.		
1er	0	0′	0″	0‴	0″	*l*	*l*′	*l*″
2e	0	0′+0	0′+0	0″+0″	0″+0″	*l*+0″	*l*′+*l*	*l*″+*l*′
3e	0	0′+0	0″+0′+0	0″+0″+0′	0‴, 0″+0″	*l*+0″+0″	*l*′+*l*+0″	*l*″+*l*′+*l*

» Maintenant, le rayon élémentaire le plus intense étant 0″ et les autres rayons ayant des valeurs d'autant plus grandes qu'ils sont plus rapprochés de ce terme, il est clair que les binomes 0″+0′ et 0‴+0″ seront les plus forts de tous les termes de la seconde série, et que, par la même raison, le trinome 0‴+0″+0′ surpassera en grandeur tous les autres termes de la troisième série. Ainsi, le second spectre n'a plus le *maximum* à la troisième bande précisément, comme le premier spectre, mais entre le troisième et le quatrième; et le troisième spectre, au lieu d'avoir le *maximum* à la troisième bande, l'a sur la quatrième, etc., c'est-à-dire que la ligne où règne la plus haute température s'éloigne d'autant plus de la limite de moindre réfrangibilité que le spectre dérive d'une portion du prisme qui contient un plus grand nombre d'éléments longitudinaux. *Le transport du* MAXIMUM *de chaleur vers la partie plus réfractée du spectre peut donc avoir lieu par le seul fait d'une augmentation de largeur dans la fraction transversale du prisme exposée au rayonnement solaire ;* ainsi, sous ce rapport, le sel gemme se conduit comme l'eau, le verre et toute autre substance transparente et incolore.

» Mais pour les milieux incolores différents du sel gemme, il existe une seconde et puissante cause qui tend à déplacer le *maximum*, savoir : l'absorption plus ou moins énergique que ces substances exercent sur la chaleur obscure. Il est aisé de démontrer que le déplacement produit en vertu de cette absorption se fait, comme le précédent, dans le sens de la réfrangibilité, et qu'il augmente, comme le

précédent, avec la largeur du prisme. En effet, imaginons une substance qui absorbe toute la chaleur obscure : les cinq premiers termes de nos séries seront détruits, les autres plus ou moins modifiés, et le *maximum* de chaleur passera au huitième terme par la troisième série, au septième par la seconde, au sixième par la première ; car on a :

$$l''+l'+l>l'+l>l, \text{ et } l'+l>l''+l>l', \; l>l'>l''$$
à cause de $l>l'$ et $l'>l''$.

» Nous avons dit que la force d'absorption des milieux diaphanes incolores sur la chaleur obscure ne s'exerce pas également sur les diverses espèces de rayons, mais qu'il est d'autant plus énergique, généralement parlant, que la réfrangibilité du rayon est moindre. Si la substance dont le prisme se compose n'absorbe pas toute la chaleur obscure, comme cela arrive effectivement, même par l'eau et l'alun, qui sont les corps doués de la moindre transmission calorifique, alors on n'a qu'à considérer les rayons obscurs non absorbés comme des rayons lumineux, et on verra que le *maximum* se déplace, dans chaque série, d'une quantité d'autant plus petite que l'absorption est moindre. Voilà pourquoi, à circonstances égales, on trouve le *maximum* de température plus ou moins avant dans l'intérieur des couleurs, selon que la substance dont le prisme est formé absorbe les différentes espèces calorifiques obscures en proportions plus ou moins grandes. Mais quelle que soit l'énergie de la force d'absorption que la substance du prisme exerce sur les radiations calorifiques obscures du soleil, on peut toujours en détruire l'influence sur la distribution des températures dans les zones colorées du spectre, en décomposant le rayon solaire avec des surfaces réfringentes suffisamment étroites, dans le sens normal à l'axe du prisme. Cela n'est qu'une conséquence immédiate des principes adoptés ; car nous venons de voir que l'empiétement de la chaleur obscure sur la partie lumineuse de nos spectres, engendrés par le même prisme plus ou moins découvert, décroît avec la largeur de la surface réfringente. Cette conséquence se trouve confirmée d'une manière frappante par nos expériences sur l'eau, où le *maximum*, placé dans le jaune du spectre donné par un prisme large de 16 millimètres, a rétrogradé jusque vers la fin du rouge dans le spectre fourni par une bande du

même prisme, prise sur le même angle réfringent et explorée à la même distance, mais n'ayant plus que 2, 5 millimètres de largeur. Que l'on réfléchisse maintenant que l'eau est le corps qui agit avec la plus grande énergie sur la chaleur obscure, celui où l'on a observé le plus grand empiétement du *maximum* de température sur les couleurs, puisque Wünsch et Seebeck ont trouvé ce *maximum* transporté jusqu'au centre du jaune, et on verra qu'il sera tout à fait superflu de rapporter ici le détail des expériences relatives à l'alcool, aux essences, à l'acide sulfurique et autres substances, qui donnèrent à nos devanciers le *maximum* dans l'orangé et le rouge. Je dirai seulement que j'ai soumis ces différents corps à des épreuves analogues à celles que je viens de décrire, et que tous m'ont conduit au même résultat final, savoir : que le *maximum* de température pour la série des rayons colorés se montre toujours à l'extrémité du rouge, lorsqu'on engendre le spectre en prenant sur le prisme une bande plus ou moins étroite, selon la thermochrose de la substance dont il est formé, et selon la disposition qu'il imprime aux rayons émergents en vertu de sa force réfringente et dispersive. Je vais seulement donner deux séries d'expériences relatives à une substance solide, pour montrer que l'état physique du milieu réfringent n'exerce aucune influence sur ce genre d'action.

Largeur de la face antérieure du prisme.		Intensité du rayonnement calorifique.				
—		A	B	C	D	E
Millim.	2	24,3	23,7	21	17,1	12,2
—	15	32,2	34,9	32,6	28,1	21,3.

» Ici, comme toujours, le *maximum* se déplace, en marchant sur la partie la plus réfractée du spectre, lorsqu'on augmente la largeur de la surface réfringente, ou *vice versâ*. On voit, en effet, que la plus haute température des couleurs se trouve entre B et C, tout près de B, c'est-à-dire dans la partie centrale du rouge pour le spectre provenant du prisme de 15 millimètres, et en A, sur le rouge extrême, pour le spectre dérivé du prisme de 2 millimètres.

» Voici, enfin, d'autres faits, qui, tout en servant de contrôle à mes expériences, impriment, si je ne me trompe, le cachet de l'évidence aux principes que nous venons de développer.

» Ayant décomposé le rayon solaire au moyen d'un beau prisme de sel gemme dont l'angle actif était de 66°, 30′ et la largeur de sa face antérieure 70 millimètres, on prit d'abord les températures des cinq points de repère du spectre ; on interposa ensuite successivement, sur le passage des rayons, d'abord une plaque de verre de 14 millimètres d'épaisseur, puis une couche d'eau d'une épaisseur à peu près égale, et on mesura à chaque fois les températures des mêmes points du spectre. Les données relatives à ces trois séries d'expériences sont inscrites dans le tableau suivant :

		Intensité du rayonnement calorifique.				
		A	B	C	D	E
Rayons émergents du prisme	libres	46,3	44,5	39,9	32,8	24,6
	transmis par le verre.	32,8	33,6	30,3	24,8	23,9
	transmis par l'eau. .	12,5	26,4	28,3	23,9	17,7

» Cela posé, on couvrit la plus grande partie du prisme de sel gemme, de manière à ne laisser agir sur les rayons solaires qu'une bande longitudinale de 5 millimètres. On répéta sur le spectre tiré du prisme ainsi préparé, les expériences que nous venons de décrire ci-dessus, en prenant les températures des rayons libres et celles que donnaient ces mêmes rayons transmis par l'eau et le verre, et on obtint les résultats suivants :

		Intensité du rayonnement calorifique.				
		A	B	C	D	E
Rayons émergents du prisme	libres	21,8	17,9	13,4	10,3	8,1
	transmis par le verre.	16,1	13,6	10,2	7,8	6,2
	transmis par l'eau. .	12,8	12,6	9,3	7,2	5,8

» Suivons la marche des nombres contenus dans les six séries d'observation. Nous voyons le verre et l'eau déplacer le *maximum* lorsque le spectre provient du prisme de sel entièrement découvert ; car la lame de verre le transporte de A en B, et la couche d'eau de A en C. Mais les mêmes corps ne produisent plus aucun changement dans la position du *maximum*, lorsque le spectre est tiré du même prisme réduit à 5 millimètres de largeur. C'est que le premier spectre contient, parmi les couleurs, des radiations de chaleur obscure, et que le second s'en trouve à peu près dépouillé.

» Concluons que, tout en admettant l'exactitude des résultats obtenus par Seebeck, Wünsch, Davy, Englefield et autres physiciens, qui se sont occupés avant nous de la distribution de la chaleur dans les spectres solaires fournis par des prismes de différentes substances incolores, nous ne saurions adopter les conséquences qu'on a cru devoir en tirer ; car la position du *maximum* d'intensité calorifique ne peut et ne doit être relative qu'à une seule série de radiations élémentaires, développées selon leurs degrés de réfrangibilité, et les expériences que nous venons de rappeler donnaient les chaleurs résultantes de la superposition de plusieurs séries, véritable *pêle-mêle*, où la force individuelle est rendue totalement méconnaissable par l'action des masses.

» Pour avoir les forces échauffantes propres aux seules couleurs du spectre, il était indispensable d'opérer sur un faisceau de rayons solaires beaucoup plus étroit, dans le sens de la normale à l'axe du prisme, que ceux qu'ont employés nos prédécesseurs ; il fallait aussi mesurer les températures des rayons élémentaires à une certaine distance dépendante de la largeur du prisme ; il fallait, enfin, avoir recours à un corps thermoscopique occupant une bande longitudinale suffisamment resserrée du spectre. Les deux premières conditions, singulièrement négligées par tous les physiciens qui ont étudié jusqu'ici la chaleur dans le spectre solaire, ressortait évidemment des expériences si précises de Newton sur la décomposition de la lumière. Quant à la troisième, personne ne semblait avoir remarqué avant nous que, dans certaines circonstances, la position du *maximum* de chaleur était hors de la zone où l'on trouvait expérimentalement la température plus élevée, lorsque le volume du corps thermoscopique employé atteignait certaines dimensions dépassées dans plusieurs expériences de nos devanciers.

» Nous avons tâché d'éviter toutes ces causes d'erreur, et alors les températures des couleurs prismatiques se sont montrées d'un caractère opposé à celui qu'on leur avait attribué d'abord ; car on avait cru qu'elles changent leurs relations mutuelles d'intensité au point de faire passer le *maximum* de l'une à l'autre couleur par l'action de diverses substances diaphanes incolores ; nous les avons vues, au contraire, maintenir constamment la plus haute température à l'extrémité du rouge, quelle que fût la qualité de la substance incolore

qu'on employait sous forme de prisme, pour décomposer le rayon solaire dans ses radiations élémentaires, ou, sous forme de lame, pour explorer l'action absorbante des corps pour ces diverses radiations.

» En employant des milieux qui ne soient pas parfaitement limpides, mais réduits à un certain degré d'opacité par la présence d'une matière brune attaquant indistinctement toutes les couleurs du spectre purifié, nous verrons, dans un autre travail, ces couleurs si intimement liées à leurs températures que, pendant la transmission, elles perdront précisément autant de chaleur que de lumière, en sorte que le rapport entre ces deux agents restera toujours inaltérable. Il est presque superflu d'ajouter que nous verrons ces mêmes teintes purifiées du spectre se réfléchir, se diffuser et se polariser, en perdant la même proportion de l'un et de l'autre agent.

» Ainsi, les radiations lumineuses, dégagées de toute radiation hétérogène, ont une chaleur propre qui suit exactement les mêmes vicissitudes; de manière que les différentes phases d'un rayon donné de *lumière simple* peuvent se mesurer indistinctement par ses rapports lumineux ou calorifiques.

» Cependant l'expérience nous a appris que les différences d'intensité calorifique et lumineuse observées par nos devanciers dans la partie inférieure du spectre solaire, dérivaient de l'absorption des milieux incolores sur les rayons obscurs découverts par Herschel père au delà de la limite rouge. Nous rassemblerons, dans le mémoire indiqué tantôt, les faits divers qui se rapportent à ces rayons, que nous trouverons doués d'une thermochrose tout à fait analogue à celle des rayons calorifiques terrestres, possédant tous les caractères de la coloration proprement dite, soit dans la radiation elle-même, soit dans la matière pondérable. On sait, d'autre part, que la chaleur obscure d'Herschel est soumise aux mêmes lois générales de propagation, de réflexion, de transmission et de polarisation qui régissent le mouvement de la lumière.

« La *visibilité* est donc la seule propriété qui distingue, dans le spectre solaire, les éléments chauds et lumineux de ceux qui sont simplement doués d'une action calorifique. Mais nous avons remarqué ailleurs que la propriété d'éclairer n'a qu'une importance tout à fait secondaire par rapport au flux rayonnant; car on trouve des personnes qui ne voient point le violet extrême du spectre; d'au-



tres qui confondent le rouge extrême avec le bleu et le vert. Or, un *rayon ne saurait être en même temps bleu, vert et rouge, visible et invisible*. La faculté d'agir ou de ne point agir sur l'œil est donc tout à fait extrinsèque, accidentelle, entièrement due à la structure particulière de l'homme et de certaines classes d'animaux ; elle ne saurait donc établir en aucune manière une différence caractéristique entre les deux agents.

» Donc, les radiations lumineuses de Newton ne diffèrent des radiations obscures d'Herschel que par des propriétés spécifiques totalement semblables à celles qui existent entre les éléments de la lumière elle-même ; c'est-à-dire qu'entre un rayon lumineux du spectre et un rayon de la chaleur obscure placé au-dessus du rouge, on trouve précisément les mêmes caractères distinctifs qui existent entre deux rayons colorés.

» Ainsi se confirme de plus en plus l'opinion énoncée déjà par nous, savoir : que la lumière n'est qu'une certaine série de radiations calorifiques sensibles à l'organe de la vue, ou *vice versâ*, que les radiations de la chaleur obscure sont de véritables *radiations invisibles de lumière*. »

Interférence des rayons calorifiques. — Dans cet ouvrage spécialement consacré à l'optique, nous ne pouvons pas accorder une grande place aux phénomènes de la chaleur rayonnante ; cependant, puisque nous aurons bientôt à traiter directement de l'identité des diverses radiations que l'analyse met en évidence dans le spectre lumineux, il importe grandement de démontrer, au moins rapidement, que les rayons calorifiques interfèrent et se polarisent de la même manière que les rayons lumineux.

M. Matteucci a le premier essayé de prouver qu'une certaine quantité de calorique ajoutée à une autre ne produit pas toujours une augmentation de chaleur. Il tenta d'abord de déterminer l'influence réciproque des rayons calorifiques en étendant à ces rayons les belles expériences de Fresnel; mais la difficulté d'avoir de bons miroirs et de disposer de l'émanation calorifique de manière qu'un petit faisceau de rayons pût agir isolément, l'obligea de suivre la route indiquée par Grimaldi. Il pratiqua dans une plaque deux ouvertures d'un millimètre de diamètre et dont les centres n'étaient qu'à deux millimètres de distance l'un de l'autre. Derrière cette plaque et

en face des ouvertures, il suspendit une boule de fer de quarante-cinq millimètres de diamètre, et dont le centre se trouvait situé à 0m,08 des ouvertures. De l'autre côté de la plaque, et sur le même plan horizontal, il plaçait la boule d'un thermoscope ou thermomètre à air. Chaque degré, correspondant à un degré Réaumur, était divisé en huit parties ; on pouvait distinguer facilement une demi-division ou un quinzième de degré. Pour que cet instrument pût servir à mesurer la température d'un espace extrêmement limité, on couvrait de noir de fumée une zone de la boule de la largeur d'un millimètre, et l'on faisait argenter le reste. On plaçait alors la boule à une distance des ouvertures telle qu'on pût présumer que les rayons calorifiques s'y trouvaient divisés ; ces préparatifs terminés, on plaçait la sphère métallique rouge derrière la plaque, et quand on plaçait la portion noircie de la boule du thermoscope sur la ligne perpendiculaire au milieu de l'intervalle qui séparait les deux ouvertures, le thermoscope montait à 16° 4/8, de 16° 1/8 qu'il indiquait auparavant. Quand on fermait une des ouvertures, le thermomètre ne montait qu'à 16° 2/8. On mit ensuite le côté noirci en face du centre de l'un des orifices et à la même distance que précédemment, le thermomètre ne monta qu'à 16° 3/8. Quand le même côté, enfin, n'était distant que d'un millimètre du centre de l'ouverture la plus rapprochée de 16° 7/8, le thermomètre monta à 17° 1/8. Il semble qu'on peut conclure de ces faits que deux faisceaux calorifiques réunis augmentent quelquefois, mais non pas toujours, la quantité de chaleur mise en évidence par le thermoscope. M. Arago, à l'occasion de cette expérience, remarqua qu'en se servant d'un corps échauffé quelque peu étendu, on ne devait pas pouvoir obtenir les alternatives de bandes chaudes et froides relativement, et il en concluait que les résultats obtenus par M. Matteucci, s'ils ne devaient pas être rejetés absolument, ne sauraient du moins être adoptés avant que de nouvelles expériences vinssent en constater suffisamment l'exactitude. Sans regarder cependant les objections de M. Arago comme irréfutables, M. Matteucci se remit à l'œuvre ; à la sphère métallique il substitua un fil de platine d'un millimètre de diamètre, recourbé à angle droit, qu'il faisait rougir au moyen d'un courant électrique, et il resta convaincu que les deux rayons calorifiques s'influençaient mutuellement, comme l'auraient fait deux

rayons lumineux ; il croit même avoir reconnu que l'interposition d'une lame mince de sulfate de chaux ou de mica déplaçait les franges, comme cela a lieu pour les interférences lumineuses.

Polarisation de la chaleur. — M. Forbes, professeur à l'université d'Édimbourg, constata le premier, en 1835, que la chaleur rayonnante qui avait traversé une première pile composée de feuilles de mica très minces, était transmise abondamment ou en petite quantité par une seconde pile, suivant la position qu'on donnait à celle-ci par rapport à la première. En plaçant les deux piles dans la position où elles transmettent peu de chaleur, et interposant entre elles une lame mince de mica, M. Forbes vit de plus que le mouvement de rotation de cette lame dans son propre plan amenait dans la quantité totale de chaleur transmise par le système, des changements considérables et de même nature que ceux qui se manifesteraient si l'on opérait sur de la lumière : cette dernière expérience constatait la dépolarisation de la chaleur. M. Melloni, de son côté, s'occupait de recherches analogues : son premier mémoire sur ce sujet a pour but l'étude de la polarisation de la chaleur rayonnante par les tourmalines, et fut présenté à l'Académie des Sciences le 25 janvier 1836. Voici les résultats qu'il obtint. L'index de polarisation, c'est-à-dire le rapport des quantités de chaleur transmises dans la position parallèle et la position rectangulaire des axes de chaque couple de tourmalines, varie considérablement avec la qualité des tourmalines ; il est compris entre 22 centièmes et 4 centièmes. Des couples de tourmalines bleues, polarisant peu de lumière, donnent souvent un index de polarisation calorifique plus grand que des couples de tourmalines vertes, qui éteignent presque complétement les rayons lumineux de la flamme. L'interposition de lames de différentes substances et de différentes épaisseurs sur le passage des rayons calorifiques, avant ou après le système polarisant, détermine des variations considérables. Il en résultait évidemment qu'il y a des circonstances où la chaleur rayonnante ne se polarise pas sensiblement par les tourmalines, qu'il y en a d'autres où elle se polarise presque complètement. Ces différences s'expliquent par l'influence absorbante des écrans, influence qu'on sait être très diverse.

Lorsqu'un rayon de lumière naturelle pénètre perpendiculairement une plaque de tourmalines taillée perpendiculairement à l'axe,

la double réfraction divise d'abord ce rayon en deux faisceaux d'intensité sensiblement égale, et polarisés à angle droit ; mais à mesure que ces faisceaux avancent dans la substance de la tourmaline, ils éprouvent une absorption très différente, et beaucoup plus forte pour celui qui subit la réfraction ordinaire, de sorte qu'au delà d'une épaisseur souvent très petite, l'autre faisceau sort seul de la plaque et se montre avec son sens propre de polarisation; c'est uniquement en vertu de l'inégale absorption de ces deux faisceaux que les phénomènes de polarisation se manifestent. Supposons maintenant que tous les rayons de chaleur dont se compose le flux calorifique subissent, comme la lumière, la double réfraction, et que chacun d'eux se divise, par conséquent, en deux filets d'égale intensité, polarisés à angle droit. Admettons, en outre, que l'inégalité d'absorption exercée par la matière de la tourmaline sur les deux filets varie avec les différents rayons calorifiques, qu'elle soit très grande pour certains rayons, faible ou nulle pour d'autres. Il est évident que les premiers sortiront de la tourmaline entièrement polarisés dans un seul plan, tandis que les derniers seront plus ou moins polarisés dans les deux plans rectangulaires, et présenteront l'apparence d'une polarisation nulle ou incomplète. En supprimant certains rayons de chaleur par l'interposition des plaques, les signes de polarisation deviendront plus ou moins sensibles, selon que la substance dont la plaque est composée absorbera des rayons donnant des couples de filets plus ou moins inégalement absorbables par la tourmaline. Le système polarisant des tourmalines exercera lui-même une action analogue à celle des autres plaques, c'est-à-dire que non-seulement il divisera chaque rayon en deux filets égaux en intensité et inégalement absorbables, mais il supprimera entièrement certaines espèces de chaleur et les couples de filets qui en dérivent; et si l'espèce de chaleur supprimée varie de l'une à l'autre tourmaline, comme il est naturel de l'admettre, la différence observée dans l'indice de polarisation calorifique des diverses tourmalines s'expliquera naturellement.

Le second mémoire de M. Melloni eut pour objet la polarisation de la chaleur produite par la réfraction simple. On sait qu'un faisceau de lumière qui traverse, sous une certaine inclinaison, une série de plaques parallèles de verre ou d'autre substance diaphane, se polarise perpendiculairement au plan d'incidence; de manière que si

l'on présente aux rayons émergents une seconde série de plaques sous la même inclinaison, la lumière passe ou se trouve en grande partie interceptée, selon que l'on dispose ce second plan d'incidence parallèlement ou perpendiculairement au premier. Pour observer des effets analogues sur la chaleur, M. Melloni fixa au foyer d'une lentille de sel gemme la flamme d'une lampe Locatelli : le faisceau de rayons calorifiques et lumineux qui en sortaient parallèlement à l'axe et dans une direction horizontale était reçu, à quatre ou cinq décimètres de distance, sur un écran métallique percé d'une petite ouverture circulaire. Derrière cette ouverture se trouvait le double système polorisant de feuilles minces de mica convenablement inclinées sur les rayons incidents, et susceptibles de tourner ensemble ou séparément autour de l'axe du faisceau lumineux et calorifique, sans changer pour cela leur inclinaison ; toutes les feuilles qui entraient dans la composition de ces paquets avaient une de leurs sections neutres dans le plan d'incidence, afin d'éliminer les effets de double réfraction et de rendre la polarisation entièrement analogue à celle qu'on produirait avec des plaques de verre ou de toute autre substance douée de la réfraction simple. La pile thermo-électrique était placée à deux ou trois décimètres de distance au delà du système polarisant. Cela posé, quand on faisait tourner un seul paquet de lames, de manière à placer son plan d'incidence perpendiculairement au premier, tout en conservant constantes les inclinaisons des lames sur l'axe du rayonnement, une forte diminution se manifestait aussitôt dans la déviation de l'aiguille aimantée. Les quantités de chaleur qui traversaient le système dans les deux positions étaient entre elles comme 100 à 43 ; il y avait donc dans la seconde disposition une perte de chaleur de 57. M. Melloni boucha l'ouverture de l'écran métallique avec une plaque de verre noir complétement opaque ; l'effet total fut diminué par l'absorption partielle de la plaque, mais les quantités de chaleur transmises dans les deux positions des lames de mica conservèrent encore leur rapport de 100 à 43, de manière que les rayons calorifiques obscurs émergents de la plaque de verre noir se polarisaient au même degré que les rayons directs de la flamme. On substitua successivement au verre noir des plaques de verre vert, d'alun, de cristal de roche, de chaux sulfatée, des couches d'eau ou d'huile ; toutes ces substances, qui, dans les premières expé-

riences, avaient fait varier l'indice de polarisation d'un même système de tourmalines depuis 4 jusqu'à 90° sur 100 de chaleur incidente, se comportèrent ici comme le verre noir, c'est-à-dire qu'elles ne produisirent aucun changement appréciable dans l'indice de polarisation, dont la valeur demeura constamment fixée à $\frac{57}{100}$. Les flux calorifiques transmis par les corps de diverse nature, flux que nous savons être d'une constitution très différente, se polarisent donc également par réfraction, ce qui prouve que la polarisation produite par les forces réfringentes des milieux est indépendante de la qualité des rayons calorifiques. Quoique cette conséquence se trouvât ainsi rigoureusement établie, M. Melloni crut devoir la confirmer par des expériences directes sur les rayons de chaleur émanés de sources différentes, en remplaçant la lampe de Locatelli par une spirale incandescente de platine, par une lame de cuivre, par un vase plein d'eau bouillante ; toujours l'indice de polarisation se trouva de 57.

La proportion de chaleur polarisée variait, comme cela devait être, avec le nombre de lames employées ; des paquets composés de cinq à six lames donnaient déjà une polarisation bien distincte : ces systèmes sont les meilleurs pour vérifier l'égalité de polarisation des rayons lancés par des sources différentes. Au moyen de deux paquets composés de dix-huit lames chacun, on obtenait une polarisation de 82 pour 100, sous une inclinaison de 35°. En substituant au faisceau de chaleur transmise un faisceau de chaleur réfléchie par une surface de verre sous un angle de 34°, on eut une polarisation de 90 pour 100.

M. Forbes avait trouvé qu'avec le même système de plaques de mica, la proportion de chaleur polarisée, exprimée en centièmes de la quantité incidente, était 29 pour une lampe d'Argant, 24 pour une lampe de Locatelli, 40 pour le platine incandescent, 22 pour le cuivre chauffé à 390°, 17 pour le mercure chauffé à 280°, et 6 pour l'eau chauffée à 98°. Le rapprochement de ces résultats avec les différences de polarisation que présentent les chaleurs émergentes des différents écrans dans leur transmission par le même système de tourmalines, aurait pu faire croire que les diverses sortes de rayons calorifiques ne possèdent pas la même aptitude à la polarisation, et cependant nous venons de voir que le contraire a lieu. Mais il faut remarquer que les expériences de M. Forbes ont été faites en négligeant com-

plétement la condition essentielle pour comparer les actions polarisantes d'un même système de lames réfringentes sur les différents rayons de chaleur, savoir une direction constante de ces rayons sur les lames de mica. En outre, la source et le thermo-multiplicateur étant, dans les expériences de M. Forbes, placés à des distances de quelques pouces, le système des lames exerçait lui-même sur le corps thermoscopique une influence sensible, provenant de leur échauffement propre, influence qui devait varier nécessairement avec la quantité et la qualité de la chaleur incidente, et aussi très probablement avec les deux positions des lames de mica. M. Forbes non plus ne s'était pas assuré préalablement que ses paquets, disposés parallèlement l'un à l'autre, transmettaient toujours une quantité de chaleur égale, lorsqu'on les faisait tourner angulairement autour de l'axe du faisceau transmis, en leur conservant une distance constante, de sorte qu'il restait douteux si les différences d'effet données par les plans d'incidence parallèles et perpendiculaires provenaient réellement d'une polarisation partielle ou d'une simple inégalité de position. Il résultait cependant des expériences de M. Forbes un fait qui était à l'abri de toute objection, savoir la différence d'effet thermoscopique, petite et constante, qui s'observait lorsqu'une nouvelle lame de mica était interposée entre les deux systèmes de lames polarisantes perpendiculairement aux rayons transmis, mais dans des positions successivement diverses de son axe de double réfraction par rapport aux plans d'incidence. Ce fait décisif doit être considéré, de l'avis même de M. Melloni, comme la première expérience qui ait établi d'une manière incontestable que les rayonnements calorifiques des sources terrestres étaient polarisables par réfraction et par double réfraction, soit en partie, soit en totalité. Mais il restait à démontrer que toutes les espèces de rayons calorifiques quelconques sont également et complétement polarisables, en sorte que sous ce rapport, comme sous le rapport de la réflexion et de la réfraction ordinaire, il y a une analogie complète de propriétés entre la lumière et la chaleur.

Faisant un pas de plus, M. Forbes découvrit, le 1er février 1835, que la chaleur complètement obscure est polarisée circulairement à l'aide de deux réflexions totales : c'est le résultat qui, relativement à la lumière, fut dans le temps une si merveilleuse prédiction de

Fresnel. Pour démontrer ce fait, M. Forbes fit construire un rhombe de sel gemme, dans la forme de celui de Fresnel, les angles étant calculés comme s'il s'agissait de la réflexion totale de la lumière, et il le plaça entre deux piles polarisantes de mica. Lorsque le plan de polarisation était perpendiculaire au plan de la réflexion totale, la chaleur émergente avait les caractères ordinaires des rayons polarisés ; quand ces mêmes plans formaient entre eux des angles de 45°, toutes les traces de polarisation avaient disparu ; la quantité de chaleur totalement réfléchie par le sel gemme est si grande, que celle qui traversait l'appareil produisait souvent plus de 12° de déviation sur le galvanomètre.

Polarisation rotatoire. — Toutes les expériences qui précèdent devaient faire croire que les rayons calorifiques seraient sensibles à l'action des substances qui dévient inégalement les plans de polarisation des divers rayons lumineux vers la droite ou vers la gauche de l'observateur. MM. Biot et Melloni ont, en effet, prouvé que les choses se passent ainsi. La manifestation de cette propriété demandait quelques précautions : le fluide calorifique, rassemblé en faisceau très dense à filets parallèles par la réfraction que produisait une lentille de sel gemme, était transmis à travers deux piles de mica très minces disposées rectangulairement. La plus voisine de la source rayonnante avait son plan d'incidence vertical, l'autre horizontal. Les lames étant supposées suffisamment nombreuses, la première pile doit polariser le flux calorifique en un seul sens, et la seconde doit le réfléchir ensuite en totalité, de sorte que l'appareil thermoscopique n'en éprouverait aucun effet. Cette rigueur n'a jamais lieu ; car la première pile laisse toujours passer une certaine quantité de chaleur non polarisée ; mais cette quantité se mesure avec facilité, et n'empêche point la manifestation des phénomènes de rotation.

Parmi les substances qui dévient les plans de polarisation des rayons lumineux, il fallait choisir celle qui, en possédant ce pouvoir au plus haut degré, absorbe le moins les flux calorifiques ; cette substance est le cristal de roche taillé perpendiculairement à l'axe. On prit d'abord une plaque qui déviait vers la droite ; son épaisseur était de 7mm,5 ; la déviation qu'elle produisait sur les plans de polarisation des rayons lumineux était de 131 degrés pour les rayons rouges extrêmes du spectre, et de 331 degrés pour les rayons extrêmes violets.

Si son influence s'étendait aux rayons de chaleur, cette plaque, placée entre les pôles, devait dévier et disperser les plans que la première pile avait réunis, et rendre ainsi le faisceau modifié plus apte à traverser la seconde pile. C'est aussi ce qui est arrivé : l'effet thermoscopique a doublé dans cette nouvelle situation de la plaque, et, en outre, il a conservé une valeur exactement constante, quand on l'a fait tourner sur elle-même dans son propre plan, autour de son axe de cristallisation; ce qui montre que la double réfraction n'était pour rien dans l'effet observé. Les choses étant disposées ainsi, on plaça derrière cette première plaque, toujours entre les piles, une seconde plaque de même épaisseur, également perpendiculaire à l'axe de double réfraction, mais qui possédait une action déviante dirigée, contrairement à la première, de la droite vers la gauche de l'observateur. Placée hors du système polarisant, cette seconde plaque diminuait la transmission d'une quantité à peine sensible. Mais entre les piles, derrière la première plaque, elle diminuait cette transmission sept à huit fois davantage, la réduisant presque au même état que si les deux plaques n'eussent pas existé. Cette seconde plaque ramenait donc la plus grande partie des rayons calorifiques à la direction commune de polarisation primitive que la pile leur avait donnée et qu'ils avaient perdue dans la première ; et, ainsi, ces deux rayons agissaient en sens contraire sur ces rayons comme sur la lumière. On a ôté cette plaque à rotation contraire, et on lui en a substitué une autre à peu près de même épaisseur, mais ayant le même sens de rotation que la première plaque : la transmission s'est trouvée aussitôt plus forte par les deux plaques que par la première seule, comme on l'avait prévu.

On a enfin interposé entre les piles une seule plaque, épaisse de 41 millimètres, qui dispersait les plans de polarisation des rayons lumineux jusqu'au point de donner deux images sensiblement incolores et d'égale intensité, lorsqu'on la faisait traverser par de la lumière blanche polarisée : elle a agi de même sur les rayons calorifiques. Alors, non-seulement la transmission par la seconde pile s'est trouvée tout à coup augmentée dans une grande proportion, mais encore on a pu faire tourner cette seconde pile autour de l'axe des faisceaux transmis, en lui donnant toutes les positions par rapport à la première, soit parallèles, soit rectangulaires; la quantité transmise est restée cons-

tante : la plaque épaisse avait ramené à l'état de chaleur naturelle le flux qui lui était arrivé polarisé dans un seul plan. Les expériences précédentes prouvent efficacement que les plans de polarisation des rayons calorifiques sont inégalement déviables, par les mêmes actions physiques, qui dévient également les plans de polarisation des rayons lumineux. L'identité se soutient ici comme ailleurs.

MM. de La Provostaye et Desains ont fait tout récemment des recherches nouvelles sur la réflexion de la chaleur rayonnante ; nous les analyserons en peu de mots, pour mieux faire ressortir les analogies et les différences qui lient ou séparent la chaleur de la lumière. Ces physiciens ont trouvé : 1° que les pouvoirs réfléchissants des métaux pour la chaleur sont très considérables ; sous l'incidence de 50°, la quantité de chaleur réfléchie est 0,97 pour l'argent bien poli, 0,77 pour le fer ; 2° les pouvoirs réflecteurs ne paraissent pas changer avec l'incidence pour des angles inférieurs à 70° ; à 75° ou 80°, la diminution est très appréciable ; il est presque impossible d'observer dans des directions plus rasantes ; on ne peut savoir dès lors si la diminution va en continuant jusqu'à 90°, ou s'il existe un minimum ; 3° le pouvoir réflecteur, variable avec la nature des métaux, dépend peu de la manière dont ils ont été travaillés, pourvu que leur degré de poli soit le même.

MM. de La Provostaye et Desains rapprochent leurs résultats de ceux auxquels MM. Potter et Forbes furent conduits dans leurs recherches relatives à la quantité de lumière réfléchie par les métaux ; je m'étonne qu'ils n'aient pas plutôt cité M. Cauchy, qui a résolu complétement le problème de la réflexion de la lumière à la surface des métaux, et déduit de formules essentiellement vraies des nombres qu'il importe grandement de comparer avec les données de l'expérience. M. Cauchy assignait à la quantité de lumière réfléchie sous l'incidence perpendiculaire par l'argent, le mercure, le métal des miroirs et l'acier, les valeurs suivantes : 0,88, 0,76, 0,62, 0,57. Sous les incidences 0°, 10°, 30°, 50°, 73°, 75°, les quantités de lumière réfléchies par l'acier étaient respectivement 0,55, 0,55, 0,54, 0,55, 0,56. Il faut conclure de ce qui précède que si les métaux réfléchissent à leur surface une plus grande proportion de chaleur que de lumière, les lois de cette réflexion sont au fond les mêmes.

RAYONS CHIMIQUES.

Découverte des rayons chimiques. — Quand, dans l'analyse de la lumière et l'étude du spectre solaire, on substitue au prisme et au thermomètre des substances impressionnables, un nouvel ordre de phénomènes apparaît tout à coup. On a sans doute observé de tout temps que les rayons lumineux exercent une action réelle de décomposition ou de transformation chimique ; on a nécessairement remarqué que, sous leur influence, les couleurs se modifient, s'effacent assez rapidement ; mais cette action chimique de la lumière ne fut bien analysée que par Scheele, vers le milieu du quinzième siècle. Scheele plaça un papier imprégné de chlorure d'argent dans le spectre produit par un prisme, et s'assura qu'il était bien plus noirci dans les rayons violets que dans les autres couleurs ; dans le violet aussi, l'oxyde d'argent se trouva plus rapidement réduit. Ces faits frappèrent d'autant plus l'illustre observateur, qu'il s'était assuré, par des expériences directes, que les rayons violets sont ceux qui éclairent et échauffent le moins : il avait vu que le chlorure d'argent renfermé dans un vase noir, ou placé dans un four chaud et obscur, ne se décomposait pas. Il prononça donc hardiment, qu'en outre des propriétés lumineuses et calorifiques, le spectre solaire est doué de propriétés chimiques, et que ces trois sortes de propriétés n'appartiennent pas dans la même proportion à toutes les parties du spectre : les rayons jaunes sont plus lumineux, les rayons rouges plus chauds, les rayons violets plus puissants comme agents chimiques. Ces expériences et les conséquences qu'il en tira constituent pour Scheele un brillant titre de gloire.

En 1802, Ritter, en Allemagne, et Wollaston, en Angleterre, reprirent, chacun de leur côté, l'étude du spectre solaire à l'aide du chlorure d'argent ; ils virent, comme Scheele, qu'au sein des rayons rouges le changement de couleur était à peine sensible, et qu'il augmentait rapidement et incessamment du rouge au violet. Il n'était guère probable qu'une action si intense cessât brusquement ; aussi les deux savants physiciens ne s'arrêtèrent-ils pas en si bon chemin : ils placèrent le précieux réactif en dehors des rayons violets, et l'effet de coloration se manifesta avec une nouvelle intensité. Il y a donc

aussi, au delà de la seconde limite apparente du spectre, de nouveaux rayons invisibles qui ne se montrent pas, qui n'échauffent pas, mais qui produisent des modifications chimiques : le pinceau de lumière blanche, si délié, si simple en apparence et si pur, est donc réellement un composé multiple, un mélange complexe d'une multitude de rayons : 1° lumineux et colorés ; 2° calorifiques, se réfractant moins que le rouge ; 3° chimiques, se réfractant plus que le violet : les uns impressionnent l'œil ; les autres sont sensibles au thermomètre ; les derniers, enfin, sont mis en évidence par une action chimique. Le spectre réel, formé de l'ensemble de ces radiations, s'étend considérablement à droite et à gauche du spectre de Newton, et occupe une étendue deux fois plus considérable.

Nous allons laisser Wollaston et Ritter nous raconter eux-mêmes la découverte inattendue des rayons chimiques obscurs. A la fin du mémoire sur l'étude des forces réfractives et dispersives, imprimé dans les *Transactions philosophiques* de 1802, Wollaston dit : « Quoique l'étendue que j'ai observée dans le spectre soit la seule visible, il y a au delà, de part et d'autre, des rayons que l'œil ne peut pas apercevoir. D'après les expériences du docteur Herschel, nous apprenons que, d'un côté, il y a des rayons invisibles qui occasionnent la chaleur et sont moins réfrangibles que les rayons rouges ; et, de l'autre, j'ai observé, et la même remarque a été faite par M. Ritter, qu'il y a des rayons invisibles d'une autre espèce qui sont plus réfractés que le violet. On ne découvre ceux-ci que par leurs effets chimiques, et le réactif le plus sensible à leur présence est le muriate blanc d'argent.

» On doit à Scheele, outre beaucoup de découvertes importantes, d'avoir le premier séparé nettement la chaleur rayonnante de la lumière (*Traité de l'Air et du Feu*, §§ 55, 57), et on lui doit aussi l'observation que le muriate d'argent se noircit plus dans le rayon violet que dans toute autre région du spectre solaire (§ 55). En répétant cette expérience, j'ai trouvé que la noirceur produite s'étendait non-seulement à l'espace occupé par le violet, mais au même degré, et à peu près à une largeur égale, au delà de la bande violette visible ; et qu'en rétrécissant le faisceau de lumière reçu sur le prisme, on pouvait faire arriver l'influence colorante presque entièrement au delà du violet.

» Il semblerait donc que cet effet et d'autres qu'on attribue ordi-



nairement à la lumière, ne sont pas réellement dus à ceux des rayons que l'organe de la vue peut apercevoir, mais à d'autres qui sont invisibles; et que si nous reconnaissons deux espèces de ceux-ci, il y en aura six en tout dans le faisceau de lumière solaire que le prisme peut décomposer, savoir quatre visibles et deux invisibles. »

Dans les *Annales* de Gilbert, tome 7, page 527, on lit cette note de Ritter :

« Le 22 février 1801, j'ai aussi rencontré des rayons du côté du violet dans le spectre solaire, en dehors de la partie visible, et cela à l'aide du chlorure d'argent. Ces rayons noircissent plus promptement encore que la lumière violette elle-même, et le champ de leur action est très considérable. A bientôt de plus grands détails à ce sujet. »

Peu de temps après, en effet, Ritter continua ses recherches, et arriva à des résultats curieux. Quand il employait le nitrate d'argent, l'action chimique s'arrêtait au vert; les rayons violet, indigo, bleu, étaient seuls excitateurs; les rayons jaune, orangé, rouge, retardaient l'action de décomposition commencée par d'autres causes; la décomposition était même rendue complétement impossible par les rayons situés à peu près au point maximum d'intensité calorifique signalé par Herschel.

Pour mieux faire ressortir la différence entre les rayons éclairants et les rayons chimiques, Ritter projetait la portion obscure prise dans un premier prisme sur la portion rouge d'un second; alors, sans qu'il y eût aucun changement dans la couleur ou la lumière, l'action chimique se manifestait énergique. Les rayons lumineux et chimiques sont en réalité si différents, si séparables, que Ritter s'était assuré qu'avec un nombre de prismes suffisant, il obtiendrait deux spectres composés exclusivement, l'un de rayons purement colorés, l'autre de rayons purement chimiques sans couleurs.

Il y a plus : en examinant le spectre à des distances assez grandes, Ritter arriva à cette conclusion, presque complétement oubliée aujourd'hui, qu'il existe plusieurs spectres chimiques placés à diverses distances des bords lumineux, même du côté du rouge : il ne chercha pas à séparer les rayons chimiques des rayons calorifiques; mais il pressentit l'influence que devait avoir sur les phénomènes observés la nature de la substance dont le prisme est formé, et recommanda à

ceux qui voudraient répéter ses expériences, de ne pas oublier que son prisme était fait de crown-glass.

On voit par ce qui précède que, dès les premières années de ce siècle, la science des rayons chimiques avait fait de très grands pas ; mais Ritter ne rencontra personne qui voulût recueillir son glorieux héritage, et, jusqu'à la magnifique découverte de la photographie, l'action chimique de la lumière fut très peu étudiée : on se bornait à constater les effets produits sur de nouvelles substances sans pénétrer plus avant. Ainsi, quand, en 1813, MM. Gay-Lussac et Thénard eurent décomposé soudainement à la lumière solaire un mélange de chlore et d'hydrogène, Seebeck eut l'heureuse idée d'enfermer tour à tour ce mélange dans des récipients de couleur bleue et rouge. Sous le verre bleu, la décomposition eut lieu en moins d'une minute ; sous le verre rouge, elle s'opéra très lentement : elle était encore inachevée après vingt minutes d'exposition à une forte lumière solaire.

En 1835, M. Hessler, professeur à Gratz, trouva que l'action chimique produite sur le papier enduit d'eau gommée et saupoudrée de chlorure d'argent variait avec la substance du prisme, soit sous le rapport de l'étendue de la partie noircie, soit sous le rapport de la place occupée par le maximum d'effet, et du temps nécessaire pour obtenir ce maximum. Ce temps était presque nul pour l'eau et pour l'esprit-de-vin, de 12 à 13 minutes pour l'huile de térébenthine et de cassia, de 2′ 3″ pour le flint-glass, de 1′ 5″ pour le crown-glass. Le maximum d'effet se trouvait, pour le spectre produit par le prisme d'esprit-de-vin, dans le violet, près du bleu ; pour celui fait avec l'eau, au milieu du violet ; pour celui fait avec l'huile de cassia, à 23 lignes hors du bord violet.

Le 17 octobre 1835, M. Arago présenta à l'Académie des Sciences une note curieuse de madame Sommerville, illustre anglaise, qui, par des travaux consciencieux, s'est conquis en Angleterre l'estime et l'admiration de tous les savants. Cette note avait pour objet des expériences relatives à la transmission des rayons chimiques du spectre solaire à travers différents milieux.

Après avoir fait ressortir ce qu'il y a de capital dans l'expérience à l'aide de laquelle M. Melloni venait de prouver que les rayons solaires peuvent, en conservant toutes leurs propriétés lumineuses,

perdre, au contraire, toutes leurs facultés calorifiques, M. Arago remarqua qu'il importait beaucoup de rechercher si des moyens analogues ne conduiraient pas à priver aussi les rayons solaires de leurs facultés chimiques; si, en un mot, des trois propriétés que possède la lumière quand elle nous arrive du soleil : 1° celle d'éclairer, 2° celle d'échauffer, 3° celle de détruire ou de déterminer des combinaisons chimiques, on ne pourrait pas lui enlever les deux dernières, et ne lui conserver que la propriété éclairante. C'est le problème que madame Sommerville a tenté de résoudre.

« Je me suis servi, dit-elle, de chlorure d'argent d'une pureté et d'une blancheur parfaites, préparé par M. Faraday. Il était à l'état liquide et pouvait s'étendre très uniformément sur le papier. Quoique cette substance soit très sensible à l'action des rayons chimiques, comme on n'a pas de moyen précis pour mesurer les changements de couleur dus à cette action, il peut y avoir de l'incertitude dans les résultats, quand il s'agit de comparer entre elles des teintes qui ne diffèrent que très peu.

» Un morceau de verre d'un vert très pâle, parfaitement transparent et ayant moins d'un vingtième de pouce d'épaisseur, n'a laissé passer aucun rayon chimique. Après une demi-heure d'exposition à un soleil très chaud, le chlorure d'argent placé derrière le verre n'offrait aucun changement de couleur. J'ai répété cette expérience sur différents verres de couleur verte, mais de teintes et d'épaisseurs différentes; je les ai toujours trouvés à peu près imperméables aux rayons chimiques, même quand ils étaient soumis beaucoup plus longtemps à l'influence solaire. Comme M. Melloni a déjà trouvé que les verres de cette couleur arrêtent les rayons calorifiques les plus réfrangibles, en rapprochant ces résultats des miens, on est conduit à conclure que ces verres ont la propriété d'intercepter en totalité la partie la plus réfrangible du spectre solaire.

» Des lames de mica vert foncé sont aussi à peu près imperméables aux rayons chimiques; cependant, quand elles sont très minces et que l'action solaire est très prolongée, on voit qu'elles n'arrêtent pas complétement les rayons.... Au contraire, six lames de mica blanc commun superposées n'ont point intercepté les rayons chimiques; cette substance paraît n'apporter presque aucun obstacle à la transmission des rayons calorifiques.

» ... Ayant soumis aux mêmes épreuves une grande émeraude dont le vert était très beau, sans cependant être foncé, et dont l'épaisseur était au moins de 0,35 de pouce, elle transmit sans difficulté les rayons chimiques. Ainsi, la matière qui colore en vert l'émeraude n'agit point sur les rayons chimiques, tandis que celle qui donne la même couleur au verre et au mica exerce sur ces rayons une action très marquée.

» Le sel gemme, comme on avait lieu de le supposer, possède à un très haut degré la propriété de transmettre les rayons chimiques. Le verre violet, coloré avec le manganèse, et le verre bleu foncé transmettent aussi très rapidement ces rayons. L'altération du chlorure d'argent sous l'action solaire se fait très promptement, malgré l'interposition d'une plaque de verre bleu de la teinte la plus foncée et épaisse de près d'un quart de pouce.

» Parmi les différentes substances que j'ai soumises à ces expériences, le sel gemme, les verres blanc, bleu et violet, sont celles qui m'ont présenté le maximum de perméabilité aux rayons chimiques, tandis que le verre et le mica verts m'en ont offert le minimum. D'autres corps présentent cette propriété à des degrés intermédiaires et qui peuvent varier de l'une à l'autre, quoique la couleur soit à peu près la même. Ainsi, le verre rouge foncé ne laisse passer que très peu de rayons chimiques, tandis que le grenat, également rouge foncé, les laisse passer presque en totalité. La topaze blanche, ainsi que la bleue, le béryl bleu pâle, la cyanite, le spath pesant, l'améthyste et diverses autres substances transmettent avec beaucoup de facilité les rayons chimiques; mais le béryl jaune n'en transmet pour ainsi dire point, et la tourmaline brune, comme la tourmaline verte, ont si peu de perméabilité que j'ai échoué dans les différents essais que j'ai faits pour polariser les rayons en question, quoique je pense que la chose ne serait pas absolument impossible si l'on avait des plaques plus minces que celles que j'ai pu employer. »

Voilà, jusqu'en 1839, c'est-à-dire jusqu'à l'emploi des plaques iodées, ce que l'on avait découvert des propriétés des rayons chimiques. Bérard, cependant, en 1812, et M. Arago, avaient montré que ces rayons se réfractaient, se réfléchissaient et interféraient comme les rayons lumineux. Depuis, on a prouvé qu'ils se polarisent, et que le spectre chimique présente toutes les solutions de



continuité ou toutes les raies du spectre coloré. Nous allons résumer rapidement les travaux qui démontrent que ces propriétés essentielles de polarisation, d'interférence, de discontinuité, s'étendent aux rayons chimiques, comme ils s'étendent aux rayons calorifiques ; puis, après une étude approfondie de la photographie, nous analyserons avec soin les innombrables travaux qui, depuis 1840, nous ont révélé tant de propriétés intimes et merveilleuses des rayons chimiques, et de la puissance photogénique de la lumière.

Polarisation des rayons chimiques. — Cette question grave, que madame Sommerville laisse indécise, a été résolue, en 1841, par M. Sutherland. Déjà Bérard, en 1812, avait signalé la propriété que possèdent les rayons chimiques d'être polarisés par réflexion sur le verre, sous le même angle de 35° 25′ sous lequel les rayons lumineux sont eux-mêmes polarisés. M. Sutherland a profité des récentes découvertes de papiers photogéniques pour refaire et étendre ces premières expériences. Il a opéré sur la lumière directe du soleil, sur celle de l'extrémité violette du spectre, et, enfin, simplement sur la lumière des nuées. Il reçut la lumière sur un cristal de spath d'Islande, et obtint ainsi, dans la chambre obscure, deux images, projetées sur un écran placé à huit pieds de distance, qui avaient un pouce de diamètre, et se trouvaient à un pouce de distance l'une de l'autre. Les deux images produisaient une très forte impression sur le papier photogénique ; l'extraordinaire, cependant, paraissait plus énergique. Aussi, c'est sur la route du faisceau extraordinaire qu'on plaça l'appareil, composé de six lames minces de mica inclinées sur l'axe du faisceau d'un angle de 45° environ. On tourna l'appareil jusqu'à ce que le plan des lames de mica coïncidât avec le plan de polarisation des rayons ; la lumière était alors à peu près éteinte, et il n'y eut pas la plus légère impression sur le papier photogénique, même au bout de cinq minutes. Les deux plans furent placés perpendiculairement l'un à l'autre ; aussitôt la lumière reparut, et le papier, au bout d'une minute, avait déjà changé ; après cinq minutes, il était devenu parfaitement noir. Cette expérience prouve que les plans de polarisation des rayons chimiques et des rayons lumineux coïncident complétement. En substituant aux lames de mica un prisme de spath d'Islande, on obtint des résultats semblables. Le rayon éteint sous le rapport lumineux ne produisait aucun effet chimique. On mit succes-

sivement sur la route du rayon éteint une lame mince de mica ou de sulfate de chaux ; aussitôt les deux images reparurent, chacune avec leur teinte ; et, en les recevant sur le papier photogénique, on obtint deux taches bien prononcées : l'image pourpre produisait plus d'effet que la jaune, la violette et la verte agissaient avec une égale intensité. On reçut également sur le papier photogénique l'image des anneaux colorés obtenus par la polarisation et traversés par la croix noire ou blanche. Que la lumière employée fût la partie violette du spectre, ou la lumière solaire, ou la portion à peine visible, le résultat fut toujours le même. L'effet chimique des rayons non éteints fut extrêmement prononcé, quoique les images fussent à peine perceptibles.

La lumière du soleil polarisée par réflexion présente exactement les mêmes phénomènes ; de sorte que les rayons lumineux et les rayons chimiques sont encore, sous ce rapport, soumis à l'action des mêmes forces polarisantes. Ajoutons, enfin, que la simple réfraction, répétée plusieurs fois, polarise aussi les rayons chimiques. L'auteur opéra, dans ce dernier cas, à la lumière des nuées ; mais pour se rendre indépendant de la variation d'intensité de cette lumière, il avait monté deux appareils semblables en tout point, si ce n'est que dans l'un les plans de polarisation étaient parallèles, tandis que dans l'autre ils étaient perpendiculaires. Ces deux appareils étaient mis en expérience au même instant ; ils y restaient pendant le même temps, et les images étaient reçues sur deux bandes de papier photogénique coupées dans un même morceau. La différence d'intensité des deux impressions était bien facilement aperçue au bout de quelques minutes.

Il résulte évidemment de ce qui précède, que l'irradiation chimique de la lumière est soumise exactement aux mêmes lois de polarisation auxquelles obéissent les émanations calorifiques et lumineuses.

Interférences des rayons chimiques. — M. Arago démontra, il y a bien longtemps, vers 1809, que les rayons chimiques interfèrent de la même manière absolument que les rayons lumineux. Si l'on fait tomber sur une couche sensible deux rayons lumineux placés dans les conditions qui les font interférer, les radiations obscures, ou plus généralement les rayons chimiques qui accompagnent les pinceaux de lumière, interféreront en même temps, et l'on verra naître sur

la couche sensible des bandes d'interférence alternativement éclairées et sombres, ce qui prouve jusqu'à l'évidence que dans certains endroits les actions se sont ajoutées, tandis que dans d'autres elles se sont neutralisées. On comprend la portée de ces curieuses expériences : quelques physiciens voulaient que les interférences ne fussent rien hors de l'œil; ce n'étaient pas pour eux des actions qui s'ajoutent ou s'annulent, mais le résultat tout naturel de l'insensibilité de l'organe de la vue pour des rayons dont la vitesse de propagation n'est pas dans certaines conditions voulues; ils se refusaient à reconnaître que de la lumière ajoutée à de la lumière puisse produire de l'obscurité, car ce simple fait aurait renversé de fond en comble leur théorie favorite de l'émission. En prouvant que les bandes d'interférence ne sont pas un phénomène objectif, un résultat de l'insensibilité de l'œil, qu'elles apparaissent parfaitement distinctes sur toutes les couches sensibles soumises à l'influence des rayons interférents, l'expérience de M. Arago forçait à rejeter ou au moins à modifier profondément l'explication prétendue du phénomène capital des interférences. Comme nous avons déjà discuté ces objections dans la première partie de cet ouvrage, nous ne nous y arrêterons pas davantage. Continuons à en enregistrer rapidement les faits qui nous font retrouver dans les rayons chimiques les propriétés essentielles des rayons lumineux.

Raies du spectre chimique. — M. Arago disait, le 19 août 1839 : « L'observation a montré que le spectre solaire n'est pas continu, qu'il y existe des solutions de continuité transversales, des raies entièrement noires. Y a-t-il des solutions de continuité pareilles dans les rayons chimiques? S'il y en a, correspondent elles aux raies obscures de Fraunhofer? » M. Arago demandait qu'on cherchât dans l'expérience la réponse à ces importantes questions. Au premier aperçu, cette recherche aurait pu sembler superflue, car le résultat à obtenir semblait de vérité nécessaire. Comment attendre des actions photogéniques là où la lumière manque entièrement? M. Arago répondait : « Il n'est nullement démontré encore que les modifications chimiques des substances impressionnables résultent de l'action de la lumière elle-même ; ces modifications sont peut-être engendrées par des radiations obscures mêlées à la lumière proprement dite, marchant avec elle, se réfractant comme elle ; en ce cas, l'expérience

prouverait non-seulement que le spectre formé par ces rayons invisibles n'est pas continu, qu'il y existe des solutions de continuité comme dans le spectre visible, mais encore que dans les deux spectres superposés, ces solutions se correspondent exactement : ce serait là un des plus curieux, un des plus étranges résultats de la physique. » Ce résultat, qui, pour nous, n'est ni curieux ni étrange, M. Edmond Becquerel l'a mis complétement en évidence par des expériences décisives. Il a constaté rigoureusement que le spectre chimique a les mêmes raies que le spectre lumineux, quand, dans les deux rayonnements, on considère les parties de même réfrangibilité. La même cause qui a déterminé la production des raies dans la partie lumineuse a déterminé aussi celles du spectre chimique. De plus, comme généralement, pour beaucoup de substances, l'action chimique s'étend bien au delà de l'extrême violet, on retrouve dans ce prolongement du spectre solaire une nouvelle série de raies qui sont les mêmes pour tous les spectres. L'action chimique, dans certains cas, peut bien s'étendre au delà du rouge ; on y aperçoit encore des raies, mais elles sont très difficiles à dessiner : elles sont par trop confuses, tandis qu'au delà du violet, au contraire, elles sont plus nombreuses et très marquées. M. E. Becquerel, dans des dessins très bien faits, nous a donné une idée très complète de la constitution du spectre solaire au delà des parties visibles et sur une étendue égale à la moitié de la longueur du spectre lumineux.

Si l'on considère ces expériences au point de vue de la vitesse de la lumière, elles prendront un intérêt nouveau, que M. Arago a très bien fait ressortir. L'observation ayant montré que les rayons contenus dans les raies noires du spectre sont sans effet sur les substances impressionnables, il se trouve établi que toute augmentation ou diminution de vitesse qui enlève aux rayons lumineux leur éclat, leur enlève aussi leurs propriétés chimiques ; qu'ils cessent d'agir chimiquement à l'instant même où, par un changement de vitesse, ils ont perdu la faculté de produire sur la rétine les sensations lumineuses. M. Arago avait invité M. E. Becquerel à recommencer ses expériences, en s'imposant des conditions nouvelles qui semblaient devoir jeter du jour sur la manière dont la vitesse modifie l'action chimique de la lumière. Il fit remarquer que les rayons solaires se mouvant de plus en plus vite à mesure que les milieux qu'ils traver-

sent sont plus réfringents, on arriverait à quelque résultat utile en étudiant comparativement et simultanément l'action des parties chimiques sur une substance plongée par moitié dans deux milieux très dissemblables. L'expérience fut renouvelée, et l'on n'aperçut aucune différence bien sensible entre l'image du spectre sur la portion de la plaque qui est restée dans l'air et celle qui s'est formée sur la portion qui a séjourné dans l'eau : les raies de ces deux portions de spectre semblaient très bien dans le prolongement l'une de l'autre, excepté toutefois dans les portions extrêmes du spectre chimique, à droite ou à gauche, où les raies de l'image qui s'est produite dans l'eau semblent se resserrer un peu entre elles. On était tenté d'en conclure que la nature du milieu dans lequel est plongée la substance chimiquement impressionnable à l'action des rayons solaires ne modifie pas l'action de ceux-ci, de sorte que l'impression du spectre solaire sur cette substance présente toujours les mêmes raies et aux mêmes places. « Voilà donc, reprenait M. Arago, les rayons solaires se comportant exactement de même dans l'air et dans l'eau. » Dans l'air, cependant, suivant le système de l'émission, la lumière se meut beaucoup moins vite que dans l'eau ; suivant le système des ondulations, elle se meut plus lentement : la vitesse serait donc ici sans influence ; or, cette conséquence serait une difficulté nouvelle que M. Arago s'efforce de résoudre par une nouvelle hypothèse. « La vitesse, dit-il, avec laquelle un rayon lumineux traverse un corps donné, dépend exclusivement de la réfringence de ce corps et de la vitesse d'émission du rayon ou de la vitesse qu'il avait dans le vide. Le rayon qui arrive à la surface de la couche impressionnable à travers l'eau possède, au point où il rencontre cette surface, une vitesse supérieure à celle qu'avait, au même point, le rayon qui se mouvait à travers l'air ; mais dans l'intérieur même de la couche, à une profondeur suffisante, les deux rayons ont exactement la même vitesse. Faisons dépendre les phénomènes photogéniques non d'une action exercée à la surface, mais d'une action naissant dans l'intérieur de la couche, et toute difficulté disparaît ; seulement, chose singulière, on est ainsi amené à établir une distinction essentielle entre l'intérieur et la surface d'une couche dont l'épaisseur est d'une petitesse incroyable. » M. Arago ajoutait : « En envisageant ainsi les phénomènes photogéniques comme des exemples d'actions moléculaires

susceptibles d'évaluations précises, tout le monde sentira combien il serait intéressant d'intercaler des chiffres dans ces raisonnements généraux. On atteindra ce but en complétant les expériences à l'aide desquelles M. Dumas avait commencé à déterminer l'épaisseur de la couche d'iode sur laquelle se forment les images ; on portera ensuite dans l'observation des positions relatives des raies obscures tracées sur la matière impressionnable, toute l'exactitude possible, même en s'aidant, s'il se peut, du microscope ; enfin, au lieu de passer par un saut brusque de l'air à l'eau, on comparera les positions relatives des raies produites dans deux milieux légèrement différents en densité ou en réfringence. »

J'avoue ne rien comprendre à cette discussion, et je dirai même franchement qu'au fond de ces subtilités il y a quelque logomachie. Ce que M. Arago devait demander à M. Becquerel, c'était, il me semble, de s'assurer, non pas si les raies du spectre dans l'air répondaient exactement aux raies du spectre dans l'eau, mais bien si les bandes d'interférences dans l'eau étaient bien le prolongement des bandes d'interférences dans l'air. Dans ce mémoire même de M. Becquerel qui a donné occasion aux observations de M. Arago, je trouve cette phrase significative : « Nous n'avons employé, dans nos expériences, qu'un prisme de flint-glass très pur ; mais les effets seraient les mêmes si l'on faisait usage d'autres prismes. En voici les motifs. D'abord Fraunhofer a reconnu que la nature des raies était, dans le spectre lumineux, indépendante de la nature du prisme ; seulement leur position respective changeait un peu par suite de la dispersion plus ou moins grande de ce prisme. Ensuite, dans un mémoire que j'ai publié sur les effets électriques produits lors de l'action chimique de la lumière ..., j'ai fait voir qu'en employant un prisme de verre, d'eau, d'alun, de sel gemme, on obtenait des résultats qui variaient peu, relativement aux rayons chimiques. Ainsi, les conclusions que nous avons annoncées plus haut sont exactes dans toute leur généralité. » Il résulte évidemment de ce passage et de l'étude attentive des raies qu'elles dépendent essentiellement, quant au nombre et même quant à la position ou aux distances relatives, absolument ou presque absolument des sources lumineuses ; que ces positions sont à peine altérées par la différence de pouvoir réfringent ou de vitesse de propagation : on devait donc, évidemment,

s'attendre à voir que les raies du spectre coïncideraient sensiblement dans les deux milieux ; et rien ne prouve que dans les expériences de M. Becquerel cette coïncidence ait été plus parfaite qu'elle ne devait l'être, même en admettant l'influence de la dispersion ; il fut constaté, au contraire, qu'aux extrémités du spectre les raies d'un milieu n'étaient plus exactement le prolongement de celles du second milieu. Mais quand il s'agit des bandes d'interférences, c'est tout autre chose ; ici l'influence de la vitesse est considérable : comme les longueurs d'ondulations restent les mêmes dans les deux milieux, tandis que les espaces parcourus varient considérablement, les *raies* seront plus ou moins serrées suivant la résistance opposée à la marche du rayon ; et M. Arago a constaté lui-même que l'interposition d'une lame de mica déplaçait les franges produites dans l'air. Ce qu'il y aurait donc eu d'extraordinaire et d'inexplicable, ce qui seul aurait pu donner lieu aux hésitations de M. Arago, c'eût été la coïncidence constatée entre les lignes d'interférence dans l'air et dans l'eau ; mais M. Becquerel n'a rien vu de semblable. S'il avait fait cette expérience, il aurait, au contraire, reconnu que les secondes bandes n'étaient pas le prolongement des premières ; que le déplacement et la plus grande distance des bandes démontraient d'une manière irrécusable que la vitesse des rayons diminuait dans le passage à travers l'eau, et que le système de l'émission contradictoire à cette diminution de vitesse n'avait aucune probabilité.

Pour éviter bien des redites, pour respecter aussi l'ordre chronologique, et mieux préparer les esprits à des analyses excessivement délicates, nous ferons ici une étude approfondie de la photographie ; le moment, d'ailleurs, est venu de grouper tout ce qui a rapport à cette branche tout à fait nouvelle des sciences appliquées.

PHOTOGRAPHIE.

DÉFINITION. — Ce mot, formé de deux racines grecques : φως, *lumière*, et γραφω, *j'écris*, *je dessine*, désigne l'art merveilleux né de nos jours et à l'aide duquel on obtient sur des plaques métalliques, sur le papier et diverses autres substances, la représentation fidèle et fixe d'un objet quelconque, sans autre agent que la lumière même émise par l'objet. Quand l'image est reçue sur des plaques métalliques, la

photographie s'appelle *daguerréotypie*, du nom de son inventeur, M. Daguerre.

HISTOIRE DE LA PHOTOGRAPHIE. — Vers le quinzième siècle, trois savants italiens, un bénédictin du nom de Gapnutio, Léonard de Vinci, le doyen des peintres de la renaissance, et un physicien napolitain, Jean-Baptiste Porta, reconnurent, chacun de leur côté, que si l'on perce un *très petit trou* dans le volet de la fenêtre d'une chambre bien close, ou mieux encore dans une plaque métallique mince appliquée à ce volet, tous les objets extérieurs dont les rayons peuvent atteindre le trou, vont se peindre sur le mur de la chambre qui lui fait face, avec des dimensions réduites ou agrandies, selon les distances ; avec des formes et des situations relatives exactes ; enfin, avec les couleurs naturelles. Porta découvrit, peu de temps après, que le trou n'a nullement besoin d'être petit ; qu'il peut avoir une largeur quelconque, pourvu qu'on lui adapte une lentille. Les images produites par l'intermédiaire du trou ont peu d'intensité ; les autres brillent d'un éclat proportionnel à l'étendue superficielle de la lentille qui les engendre. Les premières ne sont jamais exemptes de confusion ; les images des lentilles, au contraire, quand on les reçoit exactement au foyer, ont des contours d'une grande netteté. Cette netteté est devenue vraiment étonnante depuis qu'aux lentilles simples, composées d'une seule espèce de verre et possédant dès lors autant de foyers distincts qu'il y a de couleurs différentes dans la lumière blanche, on a pu substituer des lentilles achromatiques qui réunissent tous les rayons possibles en un seul foyer, depuis, surtout, que l'on a adopté la forme périscopique, inventée par Wollaston. La chambre obscure de Porta est comme un œil artificiel, où la rétine, sur laquelle viennent se peindre les images des objets, est remplacée par un fond mobile placé au foyer de la lentille : de même que l'œil s'accommode aux distances, de même aussi, à l'aide d'un mécanisme particulier, on rapproche ou on éloigne le fond mobile, jusqu'à ce que l'image ait toute la netteté désirable : dans tout le champ que la vision embrasse, on n'aperçoit aucune aberration de sphéricité ; avec la chambre noire, pour arriver au même résultat, on substitue à la lentille bi-convexe une lentille double-convexe concave et de forme périscopique : notre œil nous montre les images droites ; renversées naturellement dans la chambre obscure, elles

sont facilement redressées, soit à l'aide d'une glace parallèle, soit à l'aide d'un prisme qui les réfracte et les retourne à la fois : la pupille de l'œil s'épanouit ou se contracte en raison inverse de l'intensité des rayons lumineux qui la frappent ; dans le même but, on place devant l'objectif des diaphragmes qui lui servent de pupille, et qui, en modérant la clarté, empêchent le vague de l'image résultant d'une lumière trop abondante, etc.

Porta fit construire des chambres noires portatives ; chacune d'elles était composée d'un tuyau plus ou moins long, armé d'une *lentille ;* l'écran blanchâtre, en papier ou en carton, sur lequel les images allaient se peindre, occupait le foyer : le physicien napolitain destinait ses petits appareils aux personnes qui ne savent pas dessiner : pour obtenir des vues parfaitement exactes des objets les plus compliqués, il proposait de suivre avec la pointe du crayon les contours de l'image focale.

« Il n'est personne, dit M. Arago, qui, après avoir remarqué la netteté de contours, la vérité de formes et de couleur, la dégradation exacte de teintes qu'offrent les images engendrées par cet instrument, n'ait vivement regretté qu'elles ne se conservassent pas d'elles mêmes, et n'ait appelé de ses vœux la découverte d'un moyen efficace de les fixer sur l'écran focal. » Aux yeux de tous, il faut également le dire, c'était là un rêve destiné à prendre place parmi les conceptions extravagantes d'un Wilkins ou d'un Cyrano de Bergerac. Le rêve cependant s'est réalisé ; prenons l'invention dans son germe et marquons-en soigneusement les progrès.

Les alchimistes réussirent jadis à unir l'argent à l'acide extrait du sel marin ; le produit de la combinaison était un sel blanc, qu'ils appelèrent *lune* ou *argent corné*, et qui n'était que du chlorure d'argent. Ce sel jouit de la propriété remarquable de noircir à la lumière d'autant plus vite que les rayons qui le frappent sont plus vifs. Couvrez une feuille de papier d'une couche de chlorure d'argent ; projetez sur cette couche, à l'aide d'une lentille, l'image d'un objet : les parties obscures de l'image, les parties sur lesquelles ne frappe aucune lumière resteront blanches ; les parties fortement éclairées deviendront complétement noires ; les demi-teintes seront représentées par des gris plus ou moins foncés. Placez une gravure sur du papier enduit de chlorure d'argent, et exposez le tout à la lumière

solaire, la gravure en dessus : les tailles remplies de noir arrêteront les rayons ; les parties de l'enduit que ces tailles touchent et recouvrent conserveront leur blancheur primitive ; dans les régions correspondantes, au contraire, à celles de la planche, où l'eau-forte ou le burin n'ont pas agi, là où le papier a conservé sa demi-diaphanéité, la lumière solaire passera et ira noircir la couche saline : le résultat nécessaire de l'opération sera donc une image semblable à la gravure par la forme, mais inverse quant aux teintes : le blanc s'y trouvera reproduit en noir, et réciproquement. Cette application si curieuse de la propriété du chlorure d'argent, découverte en 1565, cette action bien constatée de la lumière laissant sur un fond préparé une coloration véritable, sont le premier élément de la photographie. Au commencement du dix-neuvième siècle, Charles, célèbre physicien français, se servait, dans ses cours, d'un papier enduit pour engendrer des silhouettes à l'aide de l'action lumineuse. Il mourut emportant son secret, et sans qu'aucun document authentique atteste sa découverte ; et l'on doit, par conséquent, affirmer que la gloire des premiers procédés photographiques appartient à M. Wedgewood, qui, aidé de l'illustre Davy, publia, en 1802, une note curieuse, sous ce titre : *Description d'un procédé pour copier des peintures sur verre et pour faire des silhouettes, par l'action de la lumière sur le nitrate d'argent.* La justice nous fait un devoir de reproduire, avec quelques détails, ce document important.

« Le papier blanc et la peau blanche, humectés d'une solution de nitrate d'argent, ne changent pas de teinte quand on les conserve dans l'obscurité ; mais exposés à la lumière du jour, ils passent promptement au gris, puis au brun, puis, enfin, presque au noir.

» Ces changements sont d'autant plus prompts que la lumière est plus intense. Dans les rayons directs du soleil, deux ou trois minutes suffisent à produire l'effet complet ; à l'ombre, il faut plusieurs heures ; et la lumière, transmise par des verres diversement colorés, agit avec des degrés divers d'intensité. Ainsi, les rayons rouges ont peu d'effet ; les jaunes et les verts sont plus efficaces ; mais les bleus et les violets ont l'action la plus énergique.

» Ces faits conduisent à un procédé facile pour copier les contours et les ombres des peintures sur verre et se procurer des profils par l'action de la lumière. Lorsqu'on place une surface blanche, couverte



d'une solution de nitrate d'argent, derrière une peinture sur verre, et qu'on expose le tout aux rayons du soleil, les rayons transmis produisent des teintes très marquées de brun ou de noir, qui diffèrent sensiblement d'intensité, selon qu'elles correspondent aux parties du tableau plus ou moins ombrées; et là où la lumière est transmise presque en sa totalité, là le nitrate prend sa teinte la plus foncée. Lorsqu'on fait tomber sur la surface imprégnée de nitrate l'ombre d'une figure, la partie qu'elle cache demeure blanche et le reste passe très promptement au brun foncé. Pour copier les peintures sur verre, il faut appliquer la solution sur de la peau blanche : l'effet est plus prompt que sur le papier. Cette teinte une fois produite est très permanente, et on ne peut la détruire ni à l'eau ni au savon.

» Après qu'on a ainsi obtenu un profil, il faut le tenir dans l'obscurité : on peut l'exposer sans inconvénient pendant quelques minutes à la lumière du jour; et la lumière des lampes ne produit aucune altération sensible sur les teintes. On a vainement tenté d'empêcher la partie non colorée du profil d'être influencée par l'action de la lumière. Une couche mince de vernis n'a pas détruit la susceptibilité de cette matière saline à recevoir une teinte par cette action, et des lavages répétés n'empêchent pas qu'il n'en reste assez dans une peau ou dans un papier imprégné, pour que ceux-ci se noircissent en recevant les rayons solaires.

» Ce procédé a d'autres applications; on peut s'en servir pour faire des dessins de tous les objets qui ont un tissu en partie opaque et en partie transparent. Ainsi, les fibres ligneuses des feuilles et les ailes des insectes peuvent être assez exactement représentées par ce procédé. Il suffit, pour cela, de faire passer au travers la lumière solaire directe et de recevoir l'ombre sur une peau préparée. On ne réussit que médiocrement, par ce procédé, à copier des estampes ordinaires; la lumière qui traverse la partie légèrement ombrée n'agit que lentement, et celle que peuvent transmettre les parties ombrées est trop faible pour produire des teintes distinctement terminées. On a essayé aussi sans succès de copier ainsi des paysages avec la lumière de la chambre obscure : elle est trop faible pour produire un effet sensible sur le nitrate d'argent pendant la durée ordinaire de ces expériences. C'était cependant l'espérance de réussir dans cet essai, en particulier, qui avait mis M. Wedgewood sur la voie de ces recher-

ches. Mais on peut, à l'aide du microscope solaire, copier sans difficulté, sur du papier préparé, les images des objets. Seulement, pour bien réussir, il faut que ce papier soit placé à peu de distance de la lentille. La solution se prépare en mêlant une partie de nitrate d'argent avec dix d'eau. Dans ces proportions, la quantité de sel dont le papier ou la peau se trouveront imprégnés suffira à les rendre susceptibles d'être affectés par la lumière, sans que leur composition ou leur tissu soit en rien altéré. En comparant les effets produits par la lumière sur le nitrate et le muriate d'argent, il a paru évident que le muriate était le plus susceptible, et que l'un et l'autre étaient plus sensibles à l'action de la lumière lorsqu'ils étaient humides que lorqu'ils étaient secs. C'est là un fait connu depuis longtemps. Même dans le crépuscule, la couleur d'une solution de muriate d'argent étendue sur du papier et demeurant humide a passé lentement du blanc au violet léger. Le nitrate, dans la même circonstance, n'a pas changé sensiblement. Cependant, la solubilité de ce dernier sel dans l'eau lui donne un avantage sur le muriate : mais on peut néanmoins, sans difficulté, imprégner du papier ou de la peau d'une quantité suffisante de muriate, soit en délayant ce sel dans l'eau, soit en plongeant dans de l'acide muriatique étendu un papier humecté de solution de nitrate.

» Il faut se rappeler que tous les sels qui contiennent l'oxyde d'argent teignent la peau en noir d'une manière ineffaçable, jusqu'à ce que l'épiderme se soit renouvelé. Il faut donc éviter d'en laisser tomber sur les doigts. On se sert commodément d'un pinceau ou d'une brosse.

» La permanence des teintes ainsi produites sur le papier ou la peau fait présumer qu'une partie de l'oxyde métallique abandonne son acide pour s'unir à la substance végétale ou animale et former avec elle un composé insoluble. Et en supposant que cela arrive, il n'est pas improbable qu'on ne trouve des substances qui pourront détruire ce composé par des affinités ou simples ou composées. On a imaginé à cet égard quelques expériences dont il sera rendu compte plus tard. Il ne manque qu'un moyen d'empêcher que les parties claires du dessin ne soient colorées par la lumière du jour, pour que ce procédé devienne aussi utile que l'exécution en est prompte et facile. »

Cette note, on le voit, posait nettement le problème de la photo-

graphie : M. Wedgewood avait reconnu la possibilité de fixer les images formées au foyer de la chambre obscure ; il met tout en œuvre pour y parvenir ; mais il est arrêté par deux grandes difficultés qu'il ne peut pas surmonter : la lumière est trop faible ou la couche d'argent trop peu sensible, et il ne peut pas enlever à la toile de son tableau la propriété de se noircir à la lumière.

Après ces essais imparfaits, mais non pas insignifiants, comme l'a dit M. Arago, nous arrivons, sans rencontrer sur notre route aucun intermédiaire, aux recherches de MM. Niepce et Daguerre.

Les essais photographiques de M. Niepce, propriétaire retiré des environs de Châlon-sur-Saône, paraissent remonter jusqu'à l'année 1814 ; ses premières relations avec M. Daguerre sont du mois de janvier 1825 : l'indiscrétion d'un opticien de Paris avait rapproché ces deux expérimentateurs patients, qui poursuivaient séparément la solution du plus étrange des problèmes.

En 1827, M. Niepce se rendit en Angleterre, et présenta à la Société royale de Londres un mémoire sur ses travaux photographiques. Le mémoire était accompagné de plusieurs échantillons, sortis depuis des collections de divers savants anglais, et qui prouvent sans réplique que pour la copie photographique des gravures, que pour la formation à l'usage des graveurs de planches à l'état d'ébauches avancées, M. Niepce connaissait, en 1827, le moyen de faire correspondre les ombres aux ombres, les demi-teintes aux demi-teintes, les clairs aux clairs ; qu'il savait de plus, ses copies une fois engendrées, les rendre insensibles à l'action ultérieure noircissante des rayons solaires.

Mais, après une multitude d'essais infructueux, M. Niepce avait, lui aussi, à peu près renoncé à reproduire les images de la chambre obscure. Les préparations dont il faisait usage ne noircissaient pas assez vite sous l'action lumineuse : il lui fallait dix à douze heures pour engendrer un dessin ; cette lenteur désespérante entraînait après elle mille inconvénients graves. Voici quelle était la substance employée par M. Niepce. A l'aide d'une molette, il faisait dissoudre du bitume sec de Judée dans de l'huile de lavande : le résultat de cette évaporation était un vernis épais, que le physicien de Châlon appliquait par tamponnement sur une lame métallique polie, par exemple sur du cuivre plaqué ou recouvert d'une lame d'argent.

M. Daguerre s'appliqua d'abord à perfectionner la méthode de Niepce, en substituant au bitume la distillation d'huile de lavande : le nouveau résidu, dissous dans l'alcool et séché, donnait un enduit plus blanc et plus sensible : il obtint ainsi une plus grande variété de tons, plus d'éclat, plus de régularité, plus de certitude de réussir dans la manipulation.

Dire, à partir de ce point, comment M. Daguerre, en cherchant de nouvelles voies à la photographie, fut amené à essayer l'évaporation de l'iode sur le plaqué d'argent ; comment il est arrivé à reconnaître la teinte qui était la plus sensible à la lumière ; comment il a pressenti que sous cette couche, retirée intacte de la chambre noire, l'image se trouvait déjà tracée dans une perfection de détails et d'ensemble qui n'avait jamais existé dans les méthodes antérieures ; comment il a trouvé que la vapeur mercurielle était le réactif le plus puissant pour faire ressortir cette image, serait chose impossible, car ce serait faire, jour par jour, l'histoire de neuf années d'essais, encourageants quelquefois, infructueux souvent, pénibles et dispendieux toujours.

La correspondance de M. Niepce semble prouver suffisamment que M. Daguerre lui a indiqué les effets de la lumière sur l'iode mis en contact avec l'argent, dans une lettre datée du 21 mai 1834. Il restait à cette époque deux grands problèmes à résoudre : obtenir les clairs dans *l'état naturel* et *fixer les images*. Ces deux problèmes, M. Daguerre les a complétement résolus. Dans une lettre écrite de Lux, 1er novembre 1837, M. Niepce exprimait ainsi son admiration : « Quelle différence aussi entre le procédé que vous employez et celui avec lequel j'ai travaillé.... Tandis qu'il me fallait presque une journée pour faire une épreuve, il vous faut quatre minutes : quel avantage énorme ! ! ! »

Du récit que nous venons de faire, il faut nécessairement conclure que la pensée de la photographie appartient à M. Wedgewood ; que les premiers succès dignes de fixer l'attention furent obtenus par M. Niepce ; mais que M. Daguerre, surmontant toutes les difficultés, a seul résolu, de la manière la plus parfaite, le problème merveilleux de la fixation des images formées au foyer des lentilles.

L'annonce de cette brillante découverte, dans les premiers jours de janvier 1839, fut un véritable événement. Je me rappellerai toujours

l'effet étonnant que produisit, au sein de l'Académie d'abord et dans toute la France, la communication verbale faite par M. Arago dans la séance du 7 janvier. Nous en rappellerons quelques phrases : « Tout le monde a remarqué avec quelle netteté, avec quelle vérité de formes, de couleur et de ton, les objets extérieurs vont se reproduire sur l'écran placé au foyer de la large lentille qui constitue la partie essentielle de la chambre obscure.... Qui donc, après avoir admiré ces délicieuses images, ne s'abandonnait pas au regret qu'elles ne pussent pas être conservées. Ce regret sera *désormais* sans objet.... M. Daguerre a découvert des écrans particuliers sur lesquels l'image optique se dessine avec les plus minutieux détails, avec une exactitude et une finesse incroyables... les couleurs seules manquent au tableau.... La lumière reproduit elle-même les formes et les proportions des objets extérieurs, avec une précision presque mathématique ; les rapports photométriques des diverses parties blanches, noires, grises, sont exactement conservés ; mais des demi-teintes représentent le rouge, le jaune, le vert... Tous ces tableaux supportent l'examen à la loupe, sans rien perdre de leur pureté... Ce procédé n'a pas seulement exigé la découverte d'une substance plus sensible à l'action de la lumière ; il a fallu trouver encore le moyen de lui enlever à volonté cette propriété. C'est ce que M. Daguerre a fait : les dessins, quand il les a terminés, peuvent être exposés en plein soleil sans en recevoir aucune altération.... Le temps nécessaire à l'exécution d'une vue, quand on veut arriver à de grandes vigueurs de ton, varie avec l'intensité de la lumière, et dès lors avec l'heure du jour et la saison ; en été et en plein midi, huit à dix minutes suffisent. »

Quelques jours avant cette communication, un savant physicien anglais, M. Talbot, adressa à l'Académie une réclamation formelle de priorité, et disputa à M. Daguerre la double gloire : 1° d'avoir fixé les images de la chambre obscure ; 2° d'avoir rendu ces images inaltérables, de sorte qu'elles puissent soutenir l'éclat de la lumière solaire. Cette réclamation ne s'appuyait sur aucun fondement solide ; les droits de nos glorieux compatriotes étaient par trop évidents ; M. Talbot eut le bon esprit de s'en consoler noblement : « Une fois, dit-il dans une de ses lettres à M. Biot, qu'il est reconnu que mes recherches ont été parfaitement indépendantes, je ne me mettrai

pas trop en peine qu'on soit arrivé ailleurs à de semblables résultats. » Le témoignage suivant devait enlever à M. Talbot jusqu'à l'ombre de ses prétentions à la découverte de la photographie. M. Baüer, savant botaniste, dans une lettre écrite, en 1839, au rédacteur de *Litterary Gazette*, disait qu'il fit connaissance avec M. Niepce à Kew, en septembre 1827. Dans le mois de décembre suivant, M. Niepce, sur l'invitation de M. Baüer, rédigea un mémoire relatif aux procédés qu'il avait découverts pour fixer les images de la chambre obscure et pour copier des gravures à l'aide des rayons solaires. Ce mémoire, que M. Baüer a fait imprimer, porte la date du 8 décembre 1827 ; il fut présenté à la Société royale de Londres dans ce même mois de décembre ; il resta plusieurs semaines aux mains de divers membres du comité de ce corps savant ; le mémoire était accompagné de *plusieurs échantillons très intéressants, produits de la découverte de Niepce ;* s'il ne fut pas imprimé dans les *Transactions philosophiques*, c'est que l'auteur n'y avait pas décrit ses procédés. M. Baüer possède plusieurs échantillons du nouvel art, que M. Niepce lui remit en 1827 : il offre de les montrer à qui serait curieux de les étudier. Il résulte de cette lettre si loyale une preuve irrécusable de la grande antériorité de notre compatriote sur les physiciens anglais ; car d'après la propre déclaration de M. Talbot, ses premiers essais ne remontent, comme nous le verrons, qu'à 1835.

Il se passe dans le monde intellectuel des phénomènes semblables à ceux que l'on remarque dans le monde physique. A certaines époques, une grande idée envahit tout à coup un certain nombre d'esprits placés ordinairement à de grandes distances ; obscure d'abord et peu active, cette idée bientôt se développe et grandit, et on la voit éclore tout à coup sur plusieurs points à la fois.

Le fait est qu'avant que Daguerre eût fait connaître ses procédés, M. Talbot avait présenté à la Société royale de Londres une série nombreuse et variée de dessins photogéniques exécutés sur papier mais par une double opération. Dans la première image, les noirs correspondent aux parties éclairées, et réciproquement ; et c'est en copiant de nouveau cette image renversée que l'on revient à l'ordre naturel. L'ensemble des procédés de M. Talbot a reçu le nom de *calotypie*. Cet art diffère essentiellement de la daguerréotypie, d'abord par l'emploi du papier substitué au métal, puis par ce fait capital qu'on

n'arrive à l'image véritable ou positive qu'en passant par une image renversée ou négative, et que ces deux images sont obtenues sur des feuilles différentes, tandis que dans la daguerréotypie l'image positive, sous l'action des vapeurs de mercure, succède sur la même plaque métallique à l'image négative presque insensible. M. Talbot avait été devancé par M. Niepce, même quant à la calotypie ; en effet, M. Charles Chevalier, opticien, avait reçu de lui, en 1829, une plaque métallique sur laquelle on voyait une figure de Christ transportée d'une gravure sur le métal à l'aide des rayons solaires ; les blancs et les ombres s'y trouvaient reproduits comme dans l'original, sans inversion. C'est, du reste, un inconvénient évident que d'être forcé de passer par l'image négative pour arriver à la représentation fidèle des objets qu'il s'agit de reproduire.

A peine M. Arago avait-il annoncé les étonnants résultats obtenus par M. Daguerre, qu'un enthousiasme universel éclata partout. Cette découverte si inattendue, si magnifique, occupa les cent bouches de la renommée, et le nom de Daguerre devint le plus européen de l'époque. Malheureusement pour les auteurs de cette magnifique invention, il leur était impossible d'en faire un objet d'industrie, et de s'indemniser des sacrifices que leur avaient imposés tant d'essais si longtemps infructueux. Leur art n'était pas susceptible d'être protégé par un brevet. Dès qu'il aurait été connu, chacun eût pu l'exercer ; le plus maladroit devait presque, dès son début, arriver à faire des dessins aussi parfaits qu'un artiste exercé. Il fallait donc que le procédé appartînt à tout le monde ou qu'il restât inconnu. Or, quels justes regrets n'auraient pas exprimé tous les amis de l'art ou de la science, si un tel secret avait dû demeurer impénétrable au public, s'il avait dû se perdre et mourir avec ses inventeurs.

Pour ceux aussi qui ne sont pas insensibles à la gloire nationale, qui savent qu'un peuple ne brille d'un plus grand éclat au milieu des autres peuples que par les progrès plus grands qu'il fait faire à la civilisation ; pour ceux là, disons-nous, le procédé de M. Daguerre était une brillante découverte, pleine d'intérêt, riche d'avenir, qui fait époque et sera conservée comme un titre de gloire : il ne fallait pas qu'il allât à la postérité escorté d'ingratitudes ; il devait lui parvenir, au contraire, comme un éclatant témoignage de la protection que les chambres et le pays tout entier accordent aux œuvres du génie.

Dans ces circonstances exceptionnelles, le gouvernement devait donc intervenir ; c'était à lui à mettre la société en possession de la découverte dont elle demandait à jouir dans l'intérêt général, en donnant à ses glorieux auteurs la récompense de leurs travaux. Le gouvernement intervint en effet ; il accorda à MM. Niepce et Daguerre des pensions viagères de 4,000 et 6,000 francs, réversibles par moitié seulement sur leurs veuves. Libre alors et chargé officiellement d'une mission que la sympathie des inventeurs lui avait depuis longtemps confiée, M. Arago put publier, au sein de l'Académie des Sciences, les ingénieux procédés qu'on ne connaissait encore que par quelques mystérieuses épreuves ; cette communication solennelle se fit dans la séance du 19 août 1839. Ce fut pour les Académies réunies des Sciences et des Beaux-Arts un véritable jour de fête. Tout le monde comprenait la portée indéfinie de cette grande conquête. Par la découverte de M. Daguerre, la physique entre en possession d'un réactif extrêmement sensible aux influences lumineuses, d'un instrument nouveau, qui sera pour l'intensité de la lumière et les phénomènes optiques ce que le microscope est pour les petits objets, qui fournira l'occasion de nouvelles recherches et de nouveaux progrès. Les bas-reliefs, les statues, les monuments, en un mot la nature morte, sont rendus avec une perfection inabordable aux procédés ordinaires du dessin et de la peinture, et qui est égale à celle de la nature, puisque, en effet, les empreintes du daguerréotype ne sont que sa reproduction fidèle : pour copier les millions d'hiéroglyphes qui couvrent, même à l'intérieur, les grands monuments de Thèbes, de Memphis, de Karnak, etc., il faudrait des vingtaines d'années et des légions de dessinateurs ; avec le daguerréotype, un seul homme pourra mener à bonne fin cet immense travail ; de vastes étendues de caractères réels remplaceront des hiéroglyphes fictifs ou de pure convention ; les dessins surpasseront en couleur locale les œuvres des plus habiles peintres ; la perspective du paysage de chaque objet sera retracée avec une exactitude absolue ; aucun accident, aucun trait même inaperçu n'échappera à l'œil et au pinceau du nouveau peintre. Les arts industriels pour la représentation des formes, le dessin pour des modèles parfaits de perspective et d'entente de la lumière et des ombres, les sciences naturelles pour l'étude des espèces et de leur organisation, l'anthropologie pour la

reproduction des divers types, etc., etc., voient s'ouvrir une nouvelle carrière. Les épreuves daguerriennes, disait M. Paul Delaroche, portent si loin la perfection de certaines conditions essentielles, qu'elles deviendront pour les peintres même les plus habiles un sujet d'observations et d'études. La correction des lignes, la précision des formes est aussi complète que possible; le fini, d'un précieux inimaginable, ne trouble en rien la tranquillité des masses, ne nuit en aucune manière à l'effet général; le modelé est large, énergique et d'un ensemble aussi riche de ton que d'effet. En résumé, la découverte nouvelle est un immense service rendu aux sciences, aux arts et à l'industrie.

Un vide, cependant, restait encore à combler : les objets colorés ne sont point reproduits avec leurs couleurs propres, et les divers rayons lumineux n'agissant pas de la même manière sur le réactif de M. Daguerre, l'harmonie des ombres et des clairs dans les objets colorés est nécessairement un peu altérée; c'est là un point d'arrêt tracé par la nature même aux nouveaux procédés. Arrivera-t-on à leur faire reproduire des couleurs, à substituer les tableaux aux sortes de gravures à *l'aqua-tinta* qu'on engendre maintenant? Le problème sera résolu le jour où l'on aura découvert une seule et même substance que les rayons rouges coloreront en rouge, les rayons jaunes en jaune, les rayons bleus en bleu, etc., etc. M. Niepce signalait déjà des effets de cette nature; peut-être en était-il de même du rouge et du violet, que M. Seebeck obtenait simultanément sur le chorure d'argent, aux deux extrémités du spectre; M. Herschel a annoncé que son papier sensible, exposé à un spectre solaire très vif, offrait ensuite toutes les couleurs prismatiques, le rouge excepté; M. Daguerre, pendant ses premières recherches sur la phosphorescence, avait découvert une poudre qui émettait une lumière rouge, après que la lumière rouge l'avait frappée, d'autres poudres auxquelles le bleu communiquait une phosphorescence bleue, le vert une phosphorescence verte, etc.; en mêlant ces poudres mécaniquement, il obtint un composé unique qui devenait rouge dans le rouge, vert dans le vert, bleu dans le bleu, etc. En présence de ces faits, il serait certainement téméraire d'affirmer que les couleurs naturelles des objets ne seront jamais reproduites dans les images photogéniques.

Une fois tombé dans le domaine public, la daguerréotypie devait

faire des pas immenses et que l'inventeur, laissé à lui-même, n'aurait pas pu réaliser. Cette industrie occupe annuellement à Paris plus de 300 ouvriers; il se vend, année commune, 2,000 appareils; il s'emploie plus de 500,000 plaques; un nombre considérable d'amateurs ardents et acharnés consacrent leur vie entière à la multiplication indéfinie d'épreuves variées sous toutes les formes : en présence de tant d'efforts, il était impossible que des perfectionnements réels se fissent longtemps attendre; avouons qu'ils ont dépassé toutes les espérances; nous indiquerons en quelques mots les plus importants de ces progrès.

Par l'adjonction des objectifs à double verre achromatique, les foyers ont été raccourcis sans que ce raccourcissement diminuât sensiblement le champ de l'image beaucoup plus nette et plus vivement éclairée. La première pensée et la première application de cette amélioration appartiennent à M. Charles Chevalier : ces objectifs, en Allemagne, ont reçu une forme nouvelle calculée d'abord par M. Petzvald, exécutée par Voigtlander, et leur emploi très avantageux a pris depuis une extension considérable.

Venant en aide aux opticiens, MM. Claudet et Fizeau trouvèrent dans l'emploi de deux substances analogues à l'iode, le chlore et le brôme, un moyen efficace de communiquer aux plaques iodées une sensibilité incomparablement plus grande, et d'accélérer tellement la production de l'image, que les minutes de M. Daguerre furent désormais remplacées par des dixièmes de seconde.

M. Edmond Becquerel prit part à ce progrès, en mettant mieux en évidence le mode d'action des rayons lumineux, qu'il divisa en deux groupes, les rayons excitateurs et les rayons continuateurs : il vit qu'un papier photogénique exposé dans la chambre noire pendant une seule seconde, et soumis, sous un verre rouge, à l'action prolongée des rayons lumineux, donnait sans mercure des images parfaites. Appliquant cette remarque aux épreuves métalliques, M. Gaudin obtint, après une demi-seconde d'exposition, jusqu'à des nuages poussés par un grand vent.

Les premiers portraits faits au daguerréotype, et ceux que l'on fit longtemps après, furent presque désespérants. Il ne s'agissait de rien moins que de poser vingt-cinq minutes les yeux ouverts en plein soleil : quelques adeptes eurent ce courage, hélas! Au lieu de portraits, on

retrouvait sur la plaque des figures de suppliciés. Mais ce fut tout autre chose quand le temps de l'opération ne se compta plus que par secondes; on obtint alors des portraits magnifiques, parfaitement ressemblants, quelquefois même, mais trop rarement, pleins d'expression.

Ce qui manquait encore aux épreuves de M. Daguerre, c'était la vigueur de ton et surtout la solidité : il fallait encadrer l'épreuve à l'instant même, ou craindre de la voir bientôt altérée par le moindre souffle, par le frôlement si léger d'une aile de mouche. Tous les vernis essayés changeaient tellement l'effet général qu'il fallut y renoncer; la dextrine elle-même, employée d'abord avec quelque succès, s'altérait rapidement; il fallait la renouveler sans cesse, au risque de gâter l'épreuve. M. Fizeau heureusement, couronna dignement l'œuvre du maître en abritant ces épreuves infiniment délicates sous l'égide brillante et chaleureuse du plus inoxidable des métaux; l'effet des dessins était ainsi doublé, en même temps qu'ils devenaient plus inaltérables. La fixation des images par le chlorure d'or est le perfectionnement le plus important dont la daguerréotypie se soit enrichie depuis qu'elle est sortie des mains de Daguerre.

Toutes les fois que l'objet ou le groupe qui se dessinait sur la plaque iodée avait quelque étendue, son centre était parfaitement net et tranché; mais les parties latérales étaient infailliblement mal terminées. Il semblait impossible de remédier à cet inconvénient grave; on se résignait à le subir, parce qu'on le croyait une conséquence nécessaire de l'emploi des objectifs d'assez court foyer, lorsqu'un perfectionnement inattendu est venu réaliser tout à coup des résultats qui dépassent toutes les espérances. L'on peut maintenant, avec un appareil très médiocre pour les dimensions et les qualités, obtenir des épreuves d'une immense étendue longitudinale et d'une netteté exquise. Ainsi, avec un objectif $\frac{1}{4}$ double ordinaire, on obtient, sur des plaques de 38 centimètres de long, de 12 centimètres de large, des vues parfaitement nettes sur toute leur surface, et qui embrassent l'angle visuel énorme de 150 degrés. Le procédé par lequel on arrive à ce résultat consiste essentiellement : 1° dans un mouvement horizontal donné à l'objectif, et qui lui fait parcourir successivement tous les points de l'horizon; 2° dans la courbure cy-

lindrique que la feuille de plaqué est forcée de prendre au moyen d'arrêts que l'on dispose à volonté; on amène ainsi les foyers des objets les plus inégalement distants à la surface de la plaque métallique; 3° dans cette disposition qui fait qu'une fente étroite verticale ménagée au fond d'une espèce de boîte tournant avec l'objectif ne laisse agir sur la couche sensible que les rayons centraux, c'est-à-dire ceux qui n'ont aucune aberration appréciable. Nous regardons l'appareil panoramique de M. Martens, si parfaitement employé par M. Lerebours, comme un progrès réel.

Un autre progrès qui dépasse vraiment ce que l'imagination la plus exaltée aurait pu concevoir, c'est la reproduction, au moyen de la galvanoplastie, des épreuves daguerriennes. Il paraît que déjà, en novembre 1840, le docteur Kramer avait tenté avec succès cette redoutable opération : M. Charles Chevalier affirme qu'en janvier 1841, aidé de MM. Kramer et Richoux, il réussit complétement; ce succès le surprit vivement; la reproduction était si fidèle qu'on croyait, au premier abord, voir une image daguerrienne obtenue sur plaque de cuivre. Ajoutons, pour être vrai, que la première présentation authentique d'épreuves de ce genre fut faite en France par M. Fizeau, le 1er mars 1841, au sein de l'Académie. Ces essais n'ont pas été dépassés; car les grandes planches obtenues du premier jet par M. Fizeau étaient vraiment admirables. Le jeune savant constata un peu plus tard qu'une première épreuve quelconque pouvait en donner plusieurs autres sans s'altérer sensiblement.

On a aussi réussi à dorer et à argenter les épreuves daguerriennes par les procédés de M. Ruolz. On a pu même les recouvrir d'une pellicule de cuivre assez mince pour qu'il conservât sa transparence et ne masquât aucun des détails. L'épreuve alors revêt les tons si riches et si variés du cuivre rouge, depuis le rose le plus pâle jusqu'au rose vif.

L'idée de transformer en planches gravées les images daguerriennes, de manière à les multiplier par l'impression, était trop naturelle pour qu'elle ne germât pas dans beaucoup d'esprits à la fois. M. le docteur Donné obtint le premier, nous le croyons du moins, un résultat satisfaisant; le docteur Berres le suivit de près et réussit mieux. M. Grove, de son côté, résolut le même problème, mais par une méthode tout à fait différente, qui consiste essentiellement dans

une action électrique exercée sur la plaque, devenue le pôle négatif de la pile : quand on imprime avec la plaque ainsi modifiée, elle donne une image positive parfaite, qui a ses lumières et ses ombres comme dans la nature. Quelle étonnante série de merveilles : la plaque dessinée par la lumière solaire est maintenant gravée par l'électricité ! M. Fizeau, enfin, a rendu plus facile et plus sûre la transformation des épreuves en planches servant à l'impression en taille-douce. Cette opération, aujourd'hui, est toute simple et infaillible ; on retrouve dans la gravure toutes les finesses de l'épreuve photographique. Disons, en terminant, que M. Georges Edwards est parvenu à décalquer sur papier des épreuves photographiques. Quoique les calques ainsi obtenus soient loin d'offrir la beauté de la plaque primitive, ils seront souvent très utiles aux peintres voyageurs parce que ce simple croquis suffira pour éveiller leurs souvenirs.

L'histoire de la daguerréotypie est maintenant complète ; il nous reste à enseigner la pratique de cet art merveilleux et à donner, s'il se peut, la théorie des modifications successives qui conduisent à une épreuve parfaite ; nous le ferons rapidement.

DES APPAREILS EN GÉNÉRAL. — *De l'objectif.* — L'objectif est l'âme de la photographie ; sans objectif parfait, il est aussi impossible à l'opérateur le mieux exercé d'obtenir de belles épreuves qu'au peintre le plus habile d'imiter convenablement son sujet sans palette et sans pinceaux. Les objectifs à verres combinés opèrent beaucoup plus vite : il importe grandement de ne les demander qu'aux opticiens dont la réputation est telle qu'elle leur impose l'obligation de ne livrer au commerce que des produits excellents. On les payera peut-être plus cher ; mais, en photographie surtout, il n'y a rien de plus ruineux que les bons marchés. Un bon objectif doit avoir au moins 33 centimètres de foyer pour plaque entière, 14 à 15 pour quart de plaque : il doit être exempt de toute gerçure ou fils ; quelques bulles rares ne produisent aucun mauvais effet. On doit le munir d'une glace parallèle redressant les objets : si l'absolue nécessité de cette addition pour les vues est évidente d'elle-même, elle est plus grande encore pour les portraits, qui, sans cela, ne seraient point fidèles. Le diaphragme placé en avant de la première lentille a pour but d'arrêter les rayons égarés sur les bords : on perd en lumière, mais on gagne en pureté.

Chambre noire. — Elle doit satisfaire aux conditions suivantes : 1° ne laisser pénétrer la lumière que par l'objectif : toute lumière étrangère à celle de l'objet à reproduire détruit en partie le dessin, et l'on est tout étonné de retirer du mercure une épreuve voilée ; 2° ne laisser parvenir à la plaque que les rayons qui, dans leur course, n'ont pas rencontré les parois de la boîte : on y parvient par l'addition d'un diaphragme intérieur ; 3° substituer rigoureusement la plaque à la face dépolie de la glace ; on peut vérifier qu'il en est ainsi en introduisant dans la chambre, par le trou de l'objectif, un cylindre en cuivre gravé sur une génératrice.

Des plaques. — Il faut les prendre au moins au trentième pour qu'elles puissent être repolies plusieurs fois ; le doublé au dixième convient mieux pour les essais. Les bonnes plaques doivent avoir un vif éclat métallique ; elles doivent être exemptes de piqûres et de poussière ; la moindre trace de cuivre doit les faire rejeter : il faut refuser le doublé d'un aspect laiteux ; exiger une épaisseur suffisante et les dimensions précises, c'est-à-dire grande plaque, 8 pouces sur 6 ; demie, 6 sur 4 ; quart, 4 sur 3 ; grande demie, 6 sur 4 1/2 : il faut mettre au rebut les planches qui ont éprouvé cinq ou six polissages, de même que celles qui ont été fixées au chlorure d'or.

Boîte à iode. — Quel que soit le système que l'on adopte, cette boîte doit toujours être garnie complétement en verre ou en porcelaine à l'intérieur, pour que les vapeurs d'iode ne s'attachent pas à ses parois.

Boîte à mercure. — Il faut donner la préférence à celles qui sont munies d'un thermomètre et présentent une assez grande capacité.

DESCRIPTION DES PROCÉDÉS PHOTOGRAPHIQUES. — Les opérations, au nombre de huit, doivent être exécutées dans l'ordre suivant : 1° décaper et polir la plaque avec le plus grand soin, de manière à obtenir une surface d'argent aussi pure que possible ; 2° ioder cette plaque bien également ; 3° la soumettre à l'action des substances accélératrices, pour augmenter la sensibilité de la couche d'iodure d'argent ; 4° lui faire subir l'impression lumineuse dans la chambre obscure ; 5° faire paraître l'image, en exposant la plaque impressionnée aux vapeurs du mercure ; 6° laver la plaque, pour enlever les parties de la couche sensible qui continueraient à être modifiées par la lumière, ce qui amènerait la destruction de l'épreuve ; 7° fixer l'image

au moyen du chlorure d'or ; 8° sécher la plaque. A ces huit opérations fondamentales, toutes nécessaires à la formation d'une épreuve parfaite, on peut en ajouter quatre autres : 9° transformer l'épreuve en planche gravée ; 10° reproduire l'épreuve par la galvanoplastie ou la recouvrir de divers vernis métalliques ; 11° colorer l'épreuve, surtout s'il s'agit d'un portrait ; 12° décalquer l'image.

Nous allons décrire tour à tour chacune de ces opérations, en ayant soin, toujours et d'abord, de reproduire fidèlement toutes les prescriptions de M. Daguerre. Même après tant de perfectionnements, la méthode première du célèbre inventeur doit servir de base et de règle fondamentale : on réussira toujours en s'y conformant pleinement ; si l'on s'en écarte, on a grandement à craindre de tristes insuccès. Tous ceux qui ont écrit sur la daguerréotypie, tous ceux qui, dans la pratique de cet art merveilleux, mais difficile, ont obtenu de la célébrité, reconnaissent unanimement que les instructions données par M. Daguerre sont un chef-d'œuvre de précision et de vérité.

Première opération. — *Décaper et nettoyer la plaques.* — « Pour cette opération il faut : un petit flacon d'huile d'olive ; du coton cardé très fin ; de la poudre broyée excessivement fine, enfermée dans un nouet de mousseline assez claire pour que la ponce puisse passer facilement en secouant le nouet ; un flacon d'acide nitrique étendu d'eau dans la proportion d'une partie en volume d'acide contre seize parties, également en volume, d'eau distillée ; un châssis en fil de fer, sur lequel on pose les plaques pour les chauffer à l'aide d'une lampe à esprit-de-vin. Comme nous l'avons dit plus haut, les épreuves se font sur argent plaqué. La grandeur de la plaque est limitée par la dimension des appareils. Il faut commencer par la bien polir. A cet effet, on la saupoudre de ponce (en secouant sans toucher la plaque), et, avec du coton imbibé d'un peu d'huile d'olive, on la frotte légèrement en arrondissant. Il faut, pour cette opération, poser la plaque sur une feuille de papier, qu'on aura soin de renouveler de temps en temps. Il faut mettre de la ponce à plusieurs reprises et changer plusieurs fois de coton. Le mortier qu'on emploiera pour pulvériser la ponce ne devra être ni en fonte ni en cuivre, mais en porphyre. On la broiera ensuite sur une glace dépolie avec une molette en verre, en se servant d'eau bien pure. On

ne devra employer la ponce que lorsqu'elle sera parfaitement sèche. On conçoit combien il est important que la ponce soit assez fine pour ne pas rayer, puisque c'est du poli parfait de la plaque que dépend la beauté de l'épreuve. Quand la plaque est bien polie, il s'agit de la dégraisser, ce qui se fait en la saupoudrant de ponce, et en la frottant à sec avec du coton, toujours en arrondissant : il est impossible d'obtenir un bon résultat en frottant autrement. On fait ensuite un petit tampon de coton qu'il faut imbiber d'un peu d'acide étendu d'eau, comme il est ci-dessus désigné ; pour cela, on applique le tampon de coton sur le goulot du flacon, et on le renverse sens dessus dessous, en appuyant légèrement, de manière que le centre seul du tampon soit imbibé d'acide, sans en être profondément imprégné ; il en faut très peu, et il faut éviter que les doigts en soient mouillés. Alors, on frotte la plaque avec le tampon, en ayant soin d'étendre parfaitement l'acide sur toute la surface de la plaque. On change le coton et on frotte en arrondissant, afin de bien étendre la couche d'acide, qui ne doit cependant qu'effleurer, pour ainsi dire, la surface de la plaque. Il arrivera que l'acide appliqué sur la surface de la plaque se divisera en globules, qu'on ne détruira qu'en changeant de coton et en frottant de manière à étendre bien également l'acide, car les endroits où il n'aurait pas pris feraient des taches. On s'aperçoit que l'acide est bien également étendu lorsque la surface de la plaque est couverte d'un voile bien régulier sur toute son étendue. Ensuite, on saupoudre la plaque de ponce, et avec du coton qui n'a pas servi on la frotte très légèrement.

» Alors, la plaque doit être soumise à une forte chaleur. A cet effet, on la place sur le châssis de fil de fer, l'argent en dessus, et on promène sous la plaque la lampe à l'esprit-de-vin, de manière que la flamme vienne s'y briser. Après avoir fait parcourir à la lampe, pendant au moins cinq minutes, toutes les parties de la plaque, il se forme à la surface de l'argent une légère couche blanchâtre ; alors, il faut cesser l'action du feu. La chaleur de la lampe peut être remplacée par celle d'un feu de charbon, qui est même préférable, parce que l'opération est plus tôt terminée. Dans ce cas, le châssis en fil de fer est inutile ; car on pose la plaque sur des pincettes, l'argent en dessus, et on la fait aller et venir sur le fourneau, de manière qu'elle soit également échauffée, et jusqu'à ce que l'argent se couvre d'une

légère couche blanchâtre, comme il a été dit ci-dessus. On fait ensuite refroidir promptement la plaque en la plaçant sur un corps froid, tel qu'une table de marbre. Lorsqu'elle est refroidie, il faut la polir de nouveau ; ce qui se fait assez promptement, puisqu'il ne s'agit que d'enlever cette légère couche blanchâtre qui s'est formée sur l'argent. A cet effet, on saupoudre la plaque de ponce et on frotte à sec avec un tampon de coton ; on remet de la ponce à plusieurs reprises, en ayant soin de changer souvent de coton. Lorsque l'argent est bien bruni, on le frotte, comme il a été dit ci-dessus, avec de l'acide étendu d'eau, et on le saupoudre d'un peu de ponce en frottant très légèrement avec un tampon de coton. Il faut remettre de l'acide à trois reprises différentes, en ayant soin chaque fois de saupoudrer la plaque de ponce et de la frotter à sec très légèrement avec du coton bien propre, en évitant que les parties du coton qui ont été touchées par les doigts frottent sur la plaque, parce que la transpiration ferait des taches sur l'épreuve. Il faut éviter la vapeur humide de l'haleine, ainsi que les taches de salive.

» Quand on n'a pas l'intention d'opérer immédiatement, on ne met que deux fois de l'acide après l'opération du feu, ce qui permet de préparer ce travail d'avance ; mais il faut, et c'est indispensable, au moment de faire une épreuve, remettre au moins une fois de l'acide et poncer légèrement, comme il a été dit ci-dessus. Ensuite, on enlève avec du coton bien propre toute la poussière de ponce qui se trouve à la surface de la plaque, ainsi que sur ses épaisseurs. »

M. Daguerre avait reconnu lui-même que la couche d'iode était trop mince pour qu'elle pût fournir toute la dégradation de teintes nécessaire à la reproduction de la nature avec relief et fermeté ; les épreuves obtenues d'abord par lui laissaient à désirer sous le rapport de l'effet général et du modelé. Il eut alors la pensée de superposer sur la plaque plusieurs métaux en recourant au procédé suivant, que nous transcrivons exactement, mais qui n'a pas toujours réussi.

« *Première préparation de la plaque.* — *Nota.* — Pour être plus court dans la description qui va suivre, nous indiquerons chaque substance en abrégé : nous dirons, pour désigner la solution aqueuse de bichlorure de mercure, *sublimé;* pour la solution de cyanure de mercure, *cyanure;* pour l'huile de pétrole acidulée par un dixième

d'acide nitrique pur, *huile ;* pour la dissolution de chlorure d'or et de platine, *or* et *platine ;* et pour l'oxide de fer, *rouge* seulement.

» On polit la plaque avec du sublimé et du tripoli d'abord, et ensuite avec du rouge, jusqu'à ce qu'on arrive à un beau noir. Puis, on pose la plaque sur le plan horizontal, et on y verse la solution de cyanure, que l'on chauffe avec la lampe, absolument comme si l'on fixait une épreuve au chlorure d'or. Le mercure se dépose et forme une couche blanchâtre. On laisse un peu refroidir la plaque, et, après avoir renversé le liquide, on la sèche, en la frottant avec du coton et en la saupoudrant de rouge.

» Il s'agit maintenant de polir la couche blanchâtre déposée par le mercure. Avec un tampon de coton imbibé d'huile et de rouge, on frotte cette couche juste assez pour qu'elle devienne d'un beau noir. On pourra, en dernier lieu, frotter assez fortement, mais avec du coton seul, pour amincir le plus possible la couche acidulée.

» Ensuite, on place la plaque sur le plan horizontal, et on y verse la dissolution d'or et de platine. On chauffe comme à l'ordinaire, on laisse refroidir, et puis on renverse le liquide, que l'on sèche en frottant légèrement avec du coton et du rouge.

» Il faut faire cette opération avec soin, surtout lorsqu'on ne doit pas continuer immédiatement l'épreuve ; car autrement on laisserait sur la plaque des lignes de liquide qu'il est toujours difficile de faire disparaître. Par ce dernier frottage, la plaque ne doit être que séchée et non pas polie.

» Ici se borne la première préparation de la plaque, celle qui peut être faite longtemps à l'avance.

» *Seconde préparation.* — *Nota.* — Je ne crois pas convenable de mettre entre cette opération et l'iodage de la plaque un intervalle de plus de douze heures.

» Nous avons laissé la plaque avec un dépôt d'or et de platine. Pour polir cette couche métallique, il faut prendre avec un tampon de l'huile et du rouge, et frotter jusqu'à ce que la plaque redevienne noire ; et puis, avec de l'alcool et du coton seulement, on enlève le plus possible cette couche d'huile et de rouge.

» Alors, on frotte assez fortement, et en repassant plusieurs fois aux mêmes endroits, la plaque avec du coton imprégné de cyanure. Comme cette couche sèche très promptement, elle pourrait laisser

sur la plaque des traces d'inégalité; pour éviter cela, il faut repasser le cyanure, et pendant que la plaque est encore humide, avec un tampon imbibé d'un peu d'huile, on s'empresse de frotter sur toute la surface de la plaque et de mêler ainsi ces deux substances; puis, avec un tampon de coton sec, on frotte pour unir et en même temps pour dessécher la plaque, en ayant soin d'enlever du tampon de coton les parties qui s'humectent de cyanure et d'huile. Enfin, comme le coton laisse encore des traces, on saupoudre également la plaque d'un peu de rouge, que l'on fait tomber en frottant légèrement et en rond.

» Ensuite, avec un tampon imprégné d'huile seulement, on frotte la plaque également et de manière à faire revenir le bruni du métal; et puis, on saupoudre avec du rouge et l'on frotte très légèrement en rond, de manière à faire tomber tout le rouge, qui entraîne avec lui la surabondance de la couche acidulée.

» Enfin, avec un tampon de coton un peu ferme, on frotte seulement pour donner le dernier poli.

» Il n'est pas nécessaire de renouveler souvent les tampons imbibés d'huile et de rouge; il faut seulement les garantir de la poussière.

» J'ai dit plus haut que la première préparation de la plaque peut servir indéfiniment; mais on comprend que la seconde doit être modifiée, selon qu'on opère sur une plaque qui a reçue une épreuve fixée ou une non fixée.

» *Sur l'épreuve fixée.* — Il faut enlever les taches laissées par l'eau du lavage, avec l'oxyde rouge et de l'eau faiblement acidulée d'acide nitrique (à 2 degrés au printemps, et moins dans l'été).

» Ensuite, il faut polir la plaque avec de l'huile et du rouge, pour enlever toutes les traces de l'image qu'on efface.

» On continue alors l'opération, comme je viens de le dire plus haut, pour la seconde préparation de la plaque neuve, et à partir de l'emploi de l'alcool.

« *Sur l'épreuve non fixée* (mais dont la couche sensible a été enlevée, comme à l'ordinaire, dans l'hyposulfite de soude). — D'abord, il faut frotter la plaque avec de l'alcool et du rouge, pour enlever les traces de l'huile qui a servi à faire l'épreuve précédente.

» On continue ensuite comme il est indiqué plus haut pour la plaque neuve, et à partir de l'emploi de l'alcool. »

Le mode suivant de polissage est recommandé, comme très excellent, par MM. Belfield et Foucault, qui l'ont décrit dans les comptes rendus de l'Académie des sciences.

« La plaque étant fixée sur la planchette à polir, on y verse deux ou trois gouttes d'essence de térébenthine ordinaire ; on ajoute un peu de ponce ou de tripoli, et avec un tampon de coton, qui n'a pas besoin d'être neuf, on frotte en arrondissant et en décrivant une multitude de petits cercles très rapprochés, mais tous excentriques les uns aux autres.

» On aura soin de parcourir également tous les points de la superficie de la plaque. Au bout d'une minute environ, il se formera sur l'argent un cambouis noir dont on enlèvera la plus grande partie en continuant de frotter en rond avec le même coton ; on mettra alors sur la plaque un peu de ponce ou de tripoli sec, et, avec un tampon neuf, on frottera, toujours en arrondissant, jusqu'à ce que la surface de la plaque prenne un éclat vif et un bruni parfait. Voilà pour le premier temps de l'opération.

» Arrivé à ce point, on versera sur la plaque trois ou quatre gouttes d'un mélange d'essence de térébenthine et d'alcool absolu, dans la proportion de 1 partie d'alcool pour 1 1/2 de térébenthine ; on ajoutera un peu de ponce ou de tripoli, que l'on étendra légèrement sur toute la surface de la plaque avec le même tampon qui a servi à l'opération précédente. Lorsque le tripoli sera étendu régulièrement sur la couche d'argent, on l'y laissera sécher : il formera alors sur la plaque une croûte épaisse d'un blanc mat. En moins d'une minute la dessication est complète ; et, pour terminer le poli, il ne restera plus qu'à enlever la couche de tripoli. On prendra à cet effet un tampon neuf, et on frottera cette fois la plaque dans une direction transversale à l'image qu'on veut obtenir. En très peu de temps le bruni sera parfait, et la plaque sera prête à être soumise à l'iodage. »

Le polissage remplit mieux toutes les conditions voulues ; quand on l'achève avec le velours de M. Claudet, qui donne à la plaque un bruni magnifique. Pour faire ce polissoir, on prend un morceau de velours de coton blanc, qu'on a préalablement dégraissé en le faisant tremper, pendant une heure, dans un vase neuf contenant de l'eau en ébullition : on fait sécher ce velours, sans le toucher du doigt, on le coupe de la dimension nécessaire, et on le fixe avec des clous sur

un manche en bois recouvert d'abord de deux ou trois couches de drap, ce qui donne plus de souplesse. Pour polir, on saupoudre très légèrement la plaque de rouge, et l'on frotte doucement avec le velours, en rond d'abord, puis vivement en long, dans le sens du poli qu'on veut obtenir.

M. Thierry préfère le coton, qu'on remplace dès qu'il est impur, au polissoir à velours qui se salit rapidement. Le même amateur donne, sur toutes les poudres, la préférence au tripoli et au rouge d'Angleterre. Il importe grandement que ces poudres soient bien sèches et libres des gaz qu'elles auraient absorbés; la réussite de l'épreuve repose presque uniquement sur cette précaution : pour la réaliser pleinement, on met la poudre dans un vase de porcelaine, on l'arrose d'esprit-de vin concentré du commerce; en mélangeant, bien on fait du tout une pâte liquide à laquelle on met le feu et que l'on agite doucement avec une spatule pour rendre la combustion complète. L'opération terminée, la poudre étant bien sèche, on la verse dans le vase qu'on recouvre de la gaze. Quand le rouge d'Angleterre n'est pas suffisamment purifié et séché, il communique à la plaque une teinte rouge qui produit de très mauvais effets.

Un mot, enfin, sur le polisseur de M. Levret. Cet instrument est formé d'un plateau de glace et de trois boutons d'ivoire fixés par des écrous. Ces boutons correspondent aux trois angles d'un triangle, l'un d'eux se meut dans une rainure. Lorsqu'on veut placer une plaque sur ce polissoir, on la glisse sous les deux boutons fixes; puis, faisant avancer le bouton mobile, on la saisit par son autre bord, en serrant l'écrou placé sous la tablette : on comprend que le bouton mobile permet de polir sur la même tablette des plaques de différentes dimensions. Le plateau de glace est assez large pour déborder le métal de tous côtés, on peut donc le polir aussi bien sur les bords qu'au centre; et si l'on a soin de nettoyer la tablette de temps en temps, on ne risquera jamais de salir une plaque au moment où elle est presque entièrement polie, accident qui arrive trop souvent, quand on fait usage de la planchette.

DEUXIÈME OPÉRATION. — *Ioder la plaque.* — « Pour cette opération, il faut : la boîte, la planchette, quatre petites bandes métalliques de même nature que les plaques, un petit manche, une boîte de petits clous et un flacon d'iode.

Après avoir fixé la plaque sur la planchette, au moyen de bandes métalliques et de petits clous que l'on enfonce avec le manche destiné à cet usage, il faut mettre de l'iode dans la capsule qui se trouve au fond de la boîte. Il est nécessaire de diviser l'iode dans la capsule, afin que le foyer de l'émanation soit plus grand; autrement, il se formerait au milieu de la plaque des iris qui empêcheraient d'obtenir une couche égale. On place alors la planchette, le métal en dessous, sur les petits goussets placés aux quatre angles de la boîte, dont on ferme le couvercle. Dans cette position, il faut la laisser jusqu'à ce que la surface de l'argent soit couverte d'une belle couche jaune d'or. Si on l'y laissait trop longtemps, cette couche jaune d'or passerait à une couleur violâtre, qu'il faut éviter, parce qu'alors la couche n'est pas aussi sensible à la lumière. Si, au contraire, cette couche n'était pas assez jaune, l'image de la nature ne se reproduirait que très difficilement. Ainsi, la couche jaune d'or a sa nuance bien déterminée, parce qu'elle est la seule bien favorable à la production de l'effet. Le temps nécessaire pour cette opération ne peut pas être déterminé, parce qu'il dépend de plusieurs circonstances : premièrement de la température de la pièce où l'on se trouve, car cette opération doit toujours être livrée à elle-même, c'est-à-dire qu'elle doit avoir lieu sans addition d'autre chaleur que celle qu'on pourrait donner à la température de la pièce dans laquelle on opère, s'il y faisait trop froid; ce qui est très important dans cette opération, c'est que la température de l'intérieur de la boîte soit égale à celle de l'extérieur; s'il en était autrement, il arriverait que la plaque passant du froid au chaud se couvrirait d'une petite couche d'humidité qui est très nuisible à l'effet. La seconde circonstance, c'est que plus on fait usage de la boîte, moins il faut de temps, parce que le bois est à l'intérieur pénétré de la vapeur de l'iode, et que cette vapeur tend toujours à se dégager, et qu'en se dégageant de toutes les parties de l'intérieur, cette vapeur se répand bien plus également et plus promptement sur toute la surface de la plaque, ce qui est très important. C'est pour cela qu'il est bon de laisser toujours un peu d'iode dans la capsule qui se trouve au fond de la boîte, et de conserver cette dernière à l'abri de l'humidité; il est donc évident que la boite est préférable lorsqu'elle a servi quelque temps, puisque l'opération est alors plus prompte.

» Puisque, en raison des causes désignées ci-dessus, on ne peut

fixer au juste le temps nécessaire pour obtenir la couche jaune d'or (ce temps pouvant varier de cinq à trente minutes, rarement davantage, à moins qu'il ne fasse trop froid), on conçoit qu'il est indispensable de regarder la plaque de temps en temps pour s'assurer si elle a atteint le degré de jaune désigné ; mais il est important que la lumière ne vienne pas frapper directement dessus. Il peut arriver que la plaque se colore plus d'un côté que de l'autre ; dans ce cas, pour égaliser la couche, on aura soin, en remettant la planchette sur la boîte, de la retourner, non pas sens dessus dessous, mais bout pour bout. Il faut donc mettre la boîte dans une pièce obscure, où le jour n'arrive que très faiblement par la porte, qu'on laisse un peu entr'ouverte ; et lorsqu'on veut regarder la plaque, après avoir enlevé le couvercle de la boîte, on reprend la planchette par les extrémités, avec les deux mains, et on la retourne promptement ; il suffit alors que la plaque réfléchisse un endroit un peu éclairé et autant que possible éloigné, pour qu'on s'aperçoive si la couleur jaune est assez foncée. Il faut remettre très promptement la plaque sur la boîte, si la couche n'a pas atteint le ton jaune d'or : si, au contraire, cette teinte était dépassée, la couche ne pourrait pas servir, il faudrait recommencer entièrement la première opération.

» A la description, cette opération peut paraître difficile ; mais avec un peu d'habitude, on parvient à savoir à peu près le temps nécessaire pour arriver à la couleur jaune ; ainsi qu'à regarder la plaque avec une grande promptitude, de manière à ne pas donner à la lumière le temps d'agir.

» Lorsque la plaque est arrivée au degré de jaune nécessaire, il faut emboîter la planchette dans le châssis qui s'adapte à la chambre noire. Il faut éviter que le jour frappe sur la planche ; pour cela, on peut l'éclairer avec une bougie, dont la lumière a beaucoup moins d'action ; il ne faudrait pas, cependant, que cette lumière frappât trop longtemps sur la plaque, car elle y laisserait des traces. On passe ensuite à la troisième opération, qui est celle de la chambre obscure. Il faut, autant que possible, passer immédiatement de la seconde opération à la troisième, ou ne pas laisser entre elles plus d'une heure d'intervalle ; au-delà de ce temps, la combinaison de l'iode et de l'argent n'a plus la même propriété.

Nota. Avant de se servir de la boîte, il faut d'abord bien en essuyer

l'intérieur et la renverser, pour en faire tomber toutes les petites parcelles de l'iode qui pourraient s'être échappées de la capsule, en évitant de toucher l'iode, qui tacherait les doigts. La capsule doit être recouverte d'une gaze tendue sur un anneau; cette gaze a pour but de régulariser l'évaporation de l'iode et en même temps d'empêcher, quand on ferme le couvercle de la boîte, que la compression de l'air qui en résulte ne fasse voltiger les particules d'iode, qui arriveraient jusqu'à la plaque et y feraient de fortes taches. C'est pour cette cause qu'il faut toujours fermer la boîte très doucement, pour ne pas faire voltiger dans l'intérieur de la poussière qui pourrait être chargée de vapeur de l'iode.

TROISIÈME OPÉRATION. — *Soumettre la plaque à l'influence des substances accélératrices.* — Il importe, avant tout, de remarquer que l'emploi des substances accélératrices est venu apporter de nouvelles complications et de sérieuses difficultés au procédé si délicat de M. Daguerre en sorte qu'on peut dire qu'actuellement sur trente épreuves manquées, il y en a au moins vingt-cinq dont l'insuccès est dû à l'emploi de la substance accélératrice. La préparation de ces substances est très difficile, et il est plus difficile encore de les appliquer en quantité convenable et dans de justes proportions. On a aussi multiplié à l'infini ces auxiliaires précieux dont il est facile d'abuser; et cette multiplication indéfinie jette la perturbation et l'incertitude dans l'esprit des opérateurs. La seule garantie essentielle de succès, c'est de s'arrêter avec persévérance au procédé et aux substances avec lesquelles on a réussi. Les deux seuls agents qui, jusqu'ici, aient été reconnus propres à stimuler la lenteur de l'iode, sont le chlore et le brôme; ils ne sont point photogéniques par eux-mêmes, c'est-à-dire qu'employés seuls, ils ne formeraient point avec l'argent une combinaison capable de recevoir l'impression lumineuse, mais ils donnent à la plaque iodée une sensibilité exquise. Il est important que chacun sache préparer les mélanges qu'il emploie; ce n'est qu'à cette condition qu'on peut espérer de triompher de tous les obstacles. Le chlore et le brôme sont de violents corrosifs; il faut donc prendre garde d'en répandre sur ses mains et ses vêtements: ils sont extrêmement volatils, répandent des émanations fétides et délétères; il faut donc éviter de les respirer trop longtemps. Chaque substance exige, pour son application, des soins particuliers : on peut cependant établir les règles générales suivantes :

1° L'uniformité de la couche sensible est toujours une conséquence de celle de l'iodage; 2° la quantité de substance accélératrice doit être proportionnée à l'intensité de l'iodage préalable; en deçà ou au delà d'une juste mesure, on n'obtient rien de bon; réciproquement, l'iodage doit toujours être réglé sur la proportion de chlore ou de brôme contenue dans la liqueur accélératrice; 4° plus la plaque est sensible, plus il est facile de se tromper sur la durée de l'exposition à la lumière; 5° plus la couche sensible est épaisse, plus l'épreuve offrira de douceur et de modelé.

Entrons dans quelques détails sur la nature des liqueurs accélératrices les plus renommées.

Chlorure d'iode. — C'est à M. Claudet, Français, domicilié à Londres, qu'on doit la découverte du chlorure d'iode, la première en date de toutes les substances accélératrices employées en photographie. La France peut donc, comme nous l'avons dit, revendiquer pour un de ses enfants la priorité de ce remarquable perfectionnement, qui semble avoir ouvert la voie à tous les autres.

Le chlorure d'iode se prépare en faisant arriver du chlore gazeux sur de l'iode; aussitôt que le liquide résultant de ce mélange a obtenu la couleur rouge vif, l'opération est terminée. Le flacon doit être immédiatement fermé avec beaucoup de soin; pour cela, on mettra un peu de suif autour du bouchon usé à l'émeri. Le chlorure d'iode peut être employé de deux manières: 1° on en verse deux ou trois gouttes dans un vase; on met dessus une pincée de coton pour ralentir et régulariser l'évaporation; la plaque ayant été iodée jaune d'or, on l'expose au-dessus du chlorure d'iode, et lorsqu'elle a atteint la couleur rose, on la place dans la chambre noire. La seconde méthode présente de grands avantages: on verse quelques gouttes de chlorure dans un flacon d'eau pure, de manière à lui donner la coloration de l'eau-de-vie, et l'on s'en sert avec les cuvettes, de la même manière que toutes les autres substances.

Une fois obtenu, le chlorure d'iode se conserve, à l'abri de la lumière, dans un flacon bouché à l'émeri. Il est rare que son emploi ne donne pas d'excellentes épreuves; il vaut mieux, cependant, recourir aux préparations où il entre du brôme, substance plus énergique et plus prompte que le chlore, et qui fut employée pour la première fois par M. Fizeau.

Emploi du brôme par M. Fizeau. — « Lorsqu'on expose la plaque iodurée de M. Daguerre à la vapeur du brôme, celle-ci est absorbée, et il se forme une couche dont la sensibilité s'accroît avec la quantité de brôme absorbée jusqu'à une certaine limite à laquelle l'image ne se forme plus sous l'influence du mercure. Le point favorable pour opérer est près de cette limite ; trop près, l'épreuve commence à se voiler ; trop loin, la sensibilité diminue ; il fallait déterminer ce point avec précision et l'obtenir avec régularité, ce qui a présenté quelque difficulté.

» En effet, on ne peut plus avoir recours ici à la couleur de la couche sensible, qui change peu sous l'influence du brôme ; le ton jaune orangé de la plaque se charge bien un peu par la formation du brômure ; mais la couleur d'une plaque brômurée à point, et celle d'une plaque qui a dépassé la limite dont j'ai parlé, diffèrent si peu que, par ce moyen, on ne peut apprécier que d'une manière très incertaine la quantité de brôme absorbée, et, par suite, la sensibilité de la plaque.

» La méthode que j'ai proposée est exempte de cette cause d'incertitude : elle consiste à exposer la plaque à la vapeur d'une dissolution aqueuse de brôme d'un titre déterminé, pendant un temps déterminé. Je vais tâcher de l'expliquer en détail. Pour préparer une dissolution de brôme d'un titre déterminé et d'une force convenable aux opérations qui nous occupent, on prend pour point de départ la dissolution saturée de brôme dans l'eau ; on prépare cette eau saturée en mettant dans un flacon de l'eau pure et un grand excès de brôme ; on agite fortement pendant quelques minutes, et, avant de s'en servir, on laisse bien déposer tout le brôme. Maintenant un volume fixe de cette eau saturée est étendu dans un volume fixe d'eau pure, qui donne une dissolution de brôme toujours identique ; ce dosage se fait très simplement de la manière suivante : une pipette, qui aura encore un autre usage, porte un trait limitant une petite capacité ; un flacon porte aussi un trait qui limite une capacité égale à trente fois celle de la pipette ; on remplit le flacon d'eau pure jusqu'à la marque ; on remplit la pipette jusqu'à la marque de la dissolution saturée de brôme ; enfin, on verse la petite mesure dans le flacon.

» La nature de l'eau n'est pas ici sans importance ; ces proportions

se rapportent à l'eau pure, et l'on sait que l'eau des rivières, des sources, n'est pas pure; mais ces différentes eaux peuvent être employées absolument comme l'eau pure, en y ajoutant quelques gouttes d'acide nitrique, jusqu'à ce qu'elles présentent une très légère saveur acide; cinq ou six gouttes par litre suffisent pour la plupart des eaux. On a ainsi un liquide d'un jaune vif qu'il faut tenir exactement bouché; c'est la dissolution normale que j'appellerai simplement l'eau brômée pour la distinguer de l'eau saturée.

» La boîte destinée à exposer la plaque à la vapeur de l'eau brômée peut être d'une construction très variable; celle que j'ai employée dans le principe est disposée de la manière suivante: elle est en bois et se plie afin d'occuper moins d'espace; il est bon de la noircir intérieurement avec une couleur inattaquable au brôme; sa hauteur est d'environ 15 centimètres; les autres dimensions doivent être telles que la plaque se trouve dans tous les sens à 3 centimètres environ des parois; elle se compose de trois parties indépendantes l'une de l'autre: le couvercle qui est la planchette elle-même; le corps de la boîte; enfin, le fond sur lequel est placé la capsule à évaporation; ce fond mobile a son milieu légèrement creusé, ce qui sert à placer la capsule exactement à la même place dans les diverses expériences.

» La capsule à évaporation doit être à fond plat, peu profonde, et avoir une dimension à peu près égale à la moitié de la plaque; elle est recouverte d'un plan de verre, de manière à être fermée exactement.

» La pipette dont j'ai parlé va servir ici à mettre dans la capsule une quantité constante d'eau bromée, elle doit donc avoir une dimension suffisante, pour que la quantité de liquide qu'elle contient couvre tout le fond de la capsule. J'ai dit qu'il fallait exposer la plaque à la vapeur d'une dissolution de brôme d'un titre déterminé pendant un temps déterminé; or, pour que l'eau bromée soit au même titre dans les expériences successives, il est évident qu'il faut la renouveler à chaque épreuve; c'est le seul moyen d'avoir une évaporation constante, et je n'ai cru l'emploi du brôme praticable que du moment où j'ai eu la pensée d'employer ce moyen bien simple.

» Quant au temps pendant lequel la plaque doit rester à la vapeur du brôme, on comprend qu'il doive varier suivant la dimension de la boîte, la surface d'évaporation, etc.; mais, pour un même appareil,

il est constant; avec l'eau bromée au titre indiqué, ce temps doit être compris entre 30 et 60 secondes, suivant les appareils; quelques essais déterminent ce temps une fois pour toutes pour la boîte dont on se sert. Je vais indiquer en peu de mots comment tout cela se fait: on place sur une table le fond seul de la boîte avec sa capsule; on remplit la pipette d'eau brômée, que l'on fait couler dans un angle de la capsule, après avoir fait glisser le verre dépoli suffisamment pour introduire la pointe de la pipette, et l'on remet le verre en place; alors si l'appareil n'est pas sur un plan horizontal, on le met de niveau en se guidant sur la couleur de l'eau brômée à travers le plan de verre; lorsque la capsule est horizontale et que le liquide en couvre uniformément toute la surface, on complète la boîte en posant la seconde pièce sur le fond. Tout cela étant disposé et la plaque étant iodée, d'une main on découvre la capsule, de l'autre on place avec précaution la planchette sur la boîte, et aussitôt on compte exactement les secondes; il est bon de retourner la planchette vers la moitié du temps d'exposition, afin d'égaliser l'action du brôme. Pour une seconde expérience il faudra jeter la petite dose d'eau brômée et la remplacer par une semblable; le temps reste alors le même et les plaques successives présentent absolument la même sensibilité.

Emploi de la liqueur invariable de M. Thierry. — Les procédés du célèbre amateur lyonnais ont eu trop de retentissement, pour que nous puissions hésiter un instant à les faire connaître; M. Thierry a toujours obtenu des épreuves daguerriennes vraiment magnifiques, et il affirme que l'emploi de sa liqueur invariable fera presque disparaître toutes les chances d'insuccès.

» L'emploi de ma liqueur est, dit-il, d'une grande simplicité: après en avoir versé dans une capsule de manière à en couvrir le fond, il suffira d'exposer la plaque polie à son évaporation, après l'avoir préalablement essuyée avec quelques brins de coton pour faire tomber la poussière, jusqu'à ce qu'elle ait atteint la couleur *violet pensée* qui est non-seulement celle qui produira les plus beaux résultats, mais encore celle qui formera l'image avec la plus grande vitesse. Si la teinte se formait de préférence dans le milieu de la plaque, c'est qu'elle serait trop éloignée du liquide; dans le cas contraire, si elle se portait sur les bords, c'est qu'elle en serait trop rapprochée; il

sera ainsi facile de régulariser l'évaporation. En faisant usage de ma composition, il serait très nuisible de s'écarter de la couleur indiquée, car la sensibilité, bien loin d'augmenter, diminuerait énormément. Tout en étant très impressionnable dans les diverses conditions que je viens d'exposer, il est toutefois des circonstances où il est indispensable d'opérer avec une grande rapidité; d'autres où la lumière est disposée si peu favorablement, qu'il est difficile d'obtenir en moins de quelques minutes des résultats même imparfaits. J'indiquerai donc un moyen pour suppléer à ces cas divers, en accélérant encore ma liqueur; je suis d'avis que lorsqu'il s'agit de reproduire des groupes ou des portraits, il faut que l'exposition ne se prolonge pas au-delà de vingt-cinq secondes. Or, dans les cas d'empêchements que je viens de citer, j'emploie le procédé accélérateur que voici; sa simplicité le rendra praticable à tous les opérateurs.

» Dans un flacon de la contenance d'un quart de litre que je remplis d'eau ordinaire, et dont je retire un tiers pour le verser dans un deuxième flacon, je laisse tomber vingt grammes de brôme pur. J'y introduis ensuite, grains à grains, autant d'iode que le brôme peut en résoudre. Dans le deuxième flacon, je verse huit à dix grammes de chlorure d'iode rouge; il se forme aussitôt une boue noirâtre; j'ajoute alors vingt-cinq à trente gouttes d'éther sulfurique, je secoue vivement le mélange à plusieurs reprises et le laisse reposer pendant vingt-quatre heures. Lorsque le dépôt est parfaitement formé et que le liquide est devenu très limpide, je le décante avec précaution dans le premier flacon contenant le brômure d'iode, avec le soin de ne pas y laisser introduire de précipité, lequel serait très nuisible. Ce liquide, ainsi préparé, est infiniment trop concentré, il ne doit s'employer qu'après l'avoir étendu d'eau à une nuance à peu près semblable à ma composition d'iode. Quelques gouttes versées dans un flacon d'eau ordinaire suffiront pour former cette teinture que l'on versera ensuite dans une capsule très plate, afin que la plaque s'en trouve le plus rapprochée possible. Il est inutile de faire remarquer que l'on devra renverser le liquide dans le flacon après deux opérations, afin de lui rendre sa sensibilité primitive; de même que chaque jour on ajoutera quelques gouttes du liquide concentré dans ledit flacon. Comme on le voit, la plaque polie devra être exposée d'abord sur ma liqueur, dite *invariable*, jusqu'à ce qu'elle ait atteint la

nuance que je vais indiquer ci-après; elle sera ensuite transportée sur la seconde capsule contenant le liquide accélérateur destiné à compléter la teinte, et procurer par ce moyen à la couche d'iode d'argent l'extrême sensibilité demandé; mais il faudra épier avec soin ce complément, car cette dernière teinte se forme avec une extrême promptitude. Voici les nuances d'iodage que je conseille comme les plus favorables à la liqueur invariable : jaune foncé ou orange, transition au rose sur la dernière; rose foncé, transition au violet; et enfin violet, transition au violet pensée.

Comme ces substances accélératrices jouent un grand rôle dans la production d'épeuves parfaites, nous indiquerons encore les préparations suivantes.

Brômure d'iode à effets constants de M. de Vallicourt. Dans un flacon d'une contenance d'environ 5 centilitres, on verse 30 à 40 gouttes de brôme : la quantité n'a aucune espèce d'importance : on y ajoute ensuite, grain à grain, autant d'iode que le brôme en voudra dissoudre jusqu'à parfaite saturation; on sera assuré d'être arrivé à cette saturation, dès qu'il restera dans le brôme quelques grains d'iode non dissous : on peut les laisser impunément dans le flacon. Le brômure d'iode, ainsi préparé, tient fort peu de placce et peut se transporter facilement; mais il serait beaucoup trop concentré pour être employé dans cet état, à moins que l'on s'en serve sous forme de vapeur, suivant la méthode de MM. Choiselat et Ratel. Lors donc qu'on voudra s'en servir, on en versera une petite quantité, par exemple, 1 gramme dans un flacon, et on y ajoutera 200 à 250 grammes d'eau. La nuance d'iodage la plus convenable est le jaune aussi foncé que possible, transition du jaune au rose, le rose clair ou le rose rouge ou violâtre. La plaque étant iodée également à l'une de ces couleurs, on verse dans la cuvette à brôme une quantité de brômure strictement suffisante pour couvrir tout le fond, on laisse reposer environ une minute, puis on expose la plaque au-dessus de la cuvette, jusqu'à ce qu'on juge, au moyen d'un compteur ou à la couleur, qu'elle a absorbé assez de brôme.

Nous indiquerons enfin par leur nom, d'autres liqueurs accélératrices, dont on a obtenu d'excellents résultats : le Brômoforme de MM. Choiselat et Ratel, que nous retrouverons plus tard; la liqueur hongroise, la liqueur allemande ou de Reiser.

Chlorure de soufre. Les frères Nattirer ont fait une expérience pleine d'intérêt, en faisant arriver du chlore sur de la fleur de soufre; ils obtenaient un liquide rouge jaune; ils en projetaient quelques gouttes dans un vase suffisamment profond; puis, au-dessus de ce vase, à une distance de 6 à 8 pouces ils plaçaient la plaque iodée jaune, et la laissaient jusqu'à ce qu'elle devint rouge, brune ou violette. Quand après 15 ou 20 secondes, on retirait la plaque de la chambre obscure, on n'y appercevait ordinairement à la lumière de la bougie aucune trace d'image; mais si on chauffait la plaque avec précaution, ou qu'on l'exposât à la lumière diffuse ou même qu'on la laissât quelque temps dans l'obscurité, l'image apparaissait parfaitement distincte. Si la plaque était restée 2 ou 3 minutes dans la chambre obscure, l'image positive aurait été immédiatement terminée, et on l'aurait lavée comme à l'ordinaire.

M. Charles Chevalier a résumé, dans le tableau suivant, les préceptes relatifs à la teinte à la quelle il faut s'arrêter dans l'emploi des diverses substances accélératrices.

SUBSTANCE.	TEINTE de L'IODAGE.	TEINTE DE LA SUBSTANCE accélératrice.	DURÉE DE L'EXPOSITION aux vapeurs accélératrices.
1. Iode-Daguerre....	Jaune d'or......	....	....
2. Chlorure d'iode-Claudet.........	Jaune citron....	....	....
3. Liqueur de Reiser,.	....	Rose vif ou un peu foncé.........	....
4. Eau bromée-Fizeau.	Jaune orange...	....	30″ à 60″
5. Eau bromée de Brébisson.........	Presque violet...	....	1′ à 2′
6. Eau bromée de Middleton..........	Jaune très-foncé.	....	Variable.
7. Eau bromée-Foucault..........	Jaune d'or......	....	20″ à 1′
8. Liqueur hongroise.	Jaune d'or clair.	Rose clair......	....
9. Bromure d'iode-Gaudin...........	Jaune clair.....	Rose décidé.....	....
10. Bromure d'iode de Valicourt........	Jaune d'or foncé.	Rose vif.......	40″ à 50″
	Rose vif........	Violet.........	50″ à 60″
	Violet.........	Bleu vert.......	60″ à 75″
11. Brome et bromoforme-Choiselat et Ratel............	Vert métallique vu directement, rose par réflexion	....	Variable.

M. de Valicourt exalte beaucoup l'appareil régulateur de M. Béquet : La substance accélératrice qu'elle quelle soit, est par lui mise dans des conditions telles, que son évaporation est toujours la même dans un temps donné, en toutes saisons, en tous lieux, et par toutes les températures. La plaque noire donne toujours une même quantité de vapeurs accélératrices, sa sensibilité est toujours identiquement la même ; et l'expérimentateur n'a plus à tenir compte que des variations qui peuvent survenir dans l'intensité de la lumière. Cet appareil, d'ailleurs, est applicable à toutes les substances, sans exception.

MM. Belfield-Lefèvre et Léon Foucault ont indiqué, il y a quelques mois, un procédé qui permet de reproduire avec une égale perfection, dans une image daguerrienne, les tons brillants et les tons obscurs du modèle. Ce procédé consiste dans un nouveau mode de préparation de la couche sensible, qui rend les plaques aptes à conserver distinctes l'empreinte des tons les plus disparates, et les rapproche en quelque sorte de la rétine de l'homme. On polit la plaque et on l'iode comme à l'ordinaire ; puis, on lui fait absorber, par un moyen quelconque, une quantité de vapeur de brôme égale à trois fois celle que la pratique et l'usage ont reconnus susceptible de communiquer aux plaques le maximum de sensibilité. Tandis que la dose ordinaire de brôme ne change pas visiblement la teinte de la couche iodurée, celle que l'on recommande ici lui fait acquérir une teinte foncée d'un violet bleuâtre.

La sensibilité des plaques, ainsi surchargées de brôme, se trouve réduite au tiers de ce qu'elle serait, si l'on s'était arrêté à la dose ordinaire ; mais elles sont devenues aptes à donner une épreuve complète et détaillée du sujet, qui présente les plus grandes variétés de tons. Nous avons vu un petit tableau de ce genre fait par un temps de soleil ; on y voyait à la fois des nuages au ciel, des maisons blanches avec des ombres portées bien transparentes, et des arbres dont le feuillage se dessine par groupes à peu près comme un artiste les aurait indiqués.

On recommande de tripler la quantité de brôme ; parce que si l'on n'abordait pas franchement ce nouveau dosage, si l'on se tenait en deça, on serait presque sûr d'obtenir une image complètement voilée ; il ne faudrait pas non plus aller au delà, car la plaque aurait de la peine à condenser le mercure, et l'image serait moins appa-

rente. Cette propriété nouvelle et bien constatée, qu'un excès de brôme communique aux plaques iodées, pourra fournir des applications utiles.

QUATRIÈME OPÉRATION. — *Exposer la plaque à l'action de la lumière.* — « L'appareil nécessaire pour cette opération se borne à la chambre noire.

» La troisième opération est celle qui a lieu sur la nature dans la chambre noire. Il faut, autant que possible, choisir les objets éclairés par le soleil, parce qu'alors l'opération ne se produisant que par l'effet de la lumière, cette action est d'autant plus prompte que les objets sont plus fortement éclairés, et qu'ils sont de leur nature plus blancs.

» Après avoir placé la chambre obscure en face du point de vue ou objets quelconques dont on désire fixer l'image, l'essentiel est de bien mettre au foyer, c'est-à-dire de façon que les objets soient représentés avec une grande netteté, ce que l'on obtient facilement en avançant ou en reculant le châssis de la plaque dépolie qui reçoit l'image de la nature. Lorsqu'on a atteint une grande précision, on fixe la partie mobile de la chambre obscure, au moyen du bouton à vis destiné à cet usage, puis on retire le châssis de la glace en ayant soin de ne pas déranger la chambre noire, et on le remplace par l'appareil qui contient la plaque et qui prend exactement la place du châssis. Quand cet appareil est bien assujetti par les petits tourniquets de cuivre, on ferme l'ouverture de la chambre noire, puis on ouvre les portes intérieures de l'appareil par le moyen de deux demi cercles.

» Alors la plaque se trouve prête à recevoir l'impression de la vue ou des objets qu'il a choisis, il ne reste plus qu'à ouvrir le diaphragme de la chambre noire, et consulter une montre pour compter les minutes.

» Cette opération est très délicate, parce que rien n'est plus visible, et qu'il est de toute impossibilité de déterminer le temps nécessaire à la reproduction, puisqu'il dépend entièrement de l'intensité de lumière des objets qu'on veut reproduire ; ce temps peut varier pour Paris de trois à trente minutes au plus.

» Il faut aussi remarquer que les saisons ainsi que l'heure du jour influent beaucoup sur la promptitude de l'opération, les moments les

plus favorables sont de sept à trois heures; et ce qu'on obtient à Paris dans trois ou quatre minutes au mois de juin et juillet exigera cinq ou six minutes dans les mois de mai et d'août, sept ou huit en avril et septembre, et ainsi de suite dans la même proportion à mesure qu'on avance dans la saison. Ceci n'est qu'une donnée générale pour les objets très éclairés, car il arrive souvent qu'il faut vingt minutes dans les mois les plus favorables, lorsque les objets sont entièrement dans la demie teinte.

» On voit, d'après ce qui vient d'être dit, qu'il est impossible de préciser avec justesse le temps nécessaire pour obtenir les épreuves; mais avec un peu d'habitude l'on parvient facilement à l'apprécier. On conçoit que dans le midi de la France, et généralement dans tous les pays où la lumière a beaucoup d'intensité, comme en Espagne, en Italie, etc. etc., les épreuves doivent se faire plus promptement. Il est aussi très important de ne pas dépasser le temps nécessaire pour la reproduction, parce que les clairs ne seraient plus blancs : ils seraient noirci par l'action trop prolongée de la lumière, si, au contraire, le temps n'était pas suffisant, l'épreuve serait très vague et sans aucun détails.

» En supposant que l'on ait manqué une première épreuve en la retirant trop tôt, ou en la laissant trop longtemps, on en commence une autre immédiatement, et l'on est bien sûr d'arriver juste, il est même utile pour acquérir beaucoup d'habitude de faire quelques épreuves d'essais. »

Il y a dans cette opération deux difficultés principales, difficiles à surmonter : il faut, en effet, placer exactement la plaque au foyer de la lentille, et la laisser dans la chambre obscure, le temps nécessaire et suffisant; indiquons les perfectionnements récents par lesqels on s'est efforcé de faire disparaître ces obstacles.

Du foyer chimique et du foyer optique, par M. CLAUDET. — Un insuccès désolant amena M. Claudet à se poser cette question : Le foyer du daguerréotype, c'est-à-dire le foyer des rayons photogéniques ou chimiques, est-il bien le même que le foyer apparent de la lentille ou le foyer des rayons lumineux? Les rayons qui opèrent, ne sont-ils pas certainement des rayons dont la réfrangibilité est plus grande que celle des rayons lumineux? Mon appareil est achromatique; mais si les rayons qui opèrent sont au-delà du violet, à quoi



servirait l'achromatisme ? Cette idée le frappa, et de suite, il prépara plusieurs petits écrans, sur lesquels il traça des lignes noires : il les disposa sur une table à quatre pouces de distances les uns des autres, et braqua son appareil pour prendre leur image. Il mit au foyer sur le premier ; et quelle ne fut pas son étonnement, quand il vit que l'image, la plus nette et la mieux définie, était celle du troisième écran, à une distance de huit pouces du premier. Il répéta vingt fois cette expérience, et toujours il obtint le même résultat ; il ne pouvait plus rester l'ombre de doute ; il fit des portraits en mettant au foyer sur un imprimé, placé à huit pouces en avant de la figure, et il obtint les plus beaux portraits qu'il eût jamais vus.

Si on y avait fait bien attention, la théorie aurait révélé la différence signalée par M. Claudet, bien avant que le hasard la fit découvrir. Quoiqu'il en soit, il importe grandement de n'employer que des objectifs, dans lesquels le foyer chimique ou réel correspond exactement au foyer apparent ; ou de compenser, par un procédé particulier, les objectifs trop nombreux qui n'ont pas cette propriété. M. Claudet détermine d'avance pour chaque objectif et chaque distance des objets, le foyer d'action photogénique, avec une certitude qui lui promet d'obtenir constamment de belles épreuves ; mais ce procédé est long : MM. Lerebours et Secretan ont mieux résolu ce difficile problème ; leur méthode est assez certaine pour qu'on soit en droit maintenant d'exiger du fabricant un foyer d'action coïncidant avec le foyer apparent.

Appareil à l'aide duquel on peut déterminer approximativement le temps pendant lequel doivent s'exercer l'action de l'iode et celle de la lumière, par M. LEVANDOUSKI. On fait chaque jour une image-épreuve, dont voici les dispositions essentielles : Supposons que la substance accélérative employée soit du chlorure d'iode : en exposant la plaque à son action, on la recouvre d'un couvercle en laiton formé de six parties mobiles, qui s'ouvrent successivement de 10 secondes en 10 secondes. On voit que, par ce moyen, la plaque sera partagée en six bandes de couleurs différentes, et sur lesquelles la liqueur invariable aura exercée une action toujours croissante, depuis celle qui répond à 10 secondes, jusqu'à celle qui répond à 60 secondes. On place ensuite cette plaque dans la chambre obscure, mais en la recouvrant d'un couvercle

semblable formé aussi de six volets mobiles qui s'ouvriront tour à tour ; on s'arrange seulement de telle sorte que les bandes différentes d'intensité lumineuses soient perpendiculaires aux bandes iodées. Quand la plaque a été retirée de la chambre obscure, lavée et fixée, elle se montre partagée en trente-six carrés correspondants tous à des temps d'action différents, soit de la substance accélératrice, soit de la lumière : c'est ce que M. Lewandousky appelle l'image-épreuve. En la contemplant attentivement, on cherche celui des compartiments ou la reproduction de l'objet est la plus parfaite ; comme on sait à quelle durée d'exposition elle correspond, on saura immédiatement avec quelque approximation le temps pendant lequel la plaque doit rester exposée à la double action de la substance accélératrice et de la lumière. Cette méthode est très ingénieuse, mais l'instinct qui naît d'une longue expérience conduit plus sûrement au but.

Nous empruntons à M. Lerebours le tableau suivant : les opérations sont supposées faites avec le maximum de sensibilité : cette indication approchée du temps de l'exposition sera quelquefois utile.

ÉTAT DE L'ATMOSPHÈRE.	DURÉE DE L'EXPOSITION.				
	Avec 1 6.	Avec 1/4.	Avec 1/2.	PLAQUES normales	PLAQUES de 0m,24 sur 0m,32.
SUR UNE TERRASSE.	secondes	secondes	secondes	secondes	
Ciel voilé par des nuages blancs. tourné vers le nord...	2 à 4	10 à 15	15 à 20	20 à 50	1/2 à 2′
Ciel voilé par des nuages blancs. tourné vers le midi....	1 à 2	3 à 10	10 à 15	15 à 30	20 à 60″
Le modèle éclairé par le soleil..................	fraction de seconde.	1 à 2	3 à 6	6 à 10	15 à 20″

CINQUIÈME OPÉRATION. — *Soumettre la plaque à l'action des vapeurs de mercure.* — Il faut pour cette opération : un flacon de mercure contenant au moins un kilogramme, une lampe à esprit de vin, l'appareil, un entonnoir en verre à long col.

» On verse, au moyen de l'entonnoir, le mercure dans la capsule qui est au fond de l'appareil en assez grande quantité, pour que la boule du thermomètre en soit couverte ; il en faut à-peu-près un kilogramme ; ensuite, et à partir de ce moment, on ne peut s'éclairer d'une autre lumière que de celle d'une bougie.

» On retire la planchette sur laquelle est fixée la plaque de l'appareil,

qui la préserve du contact de la lumière, et on fait entrer cette planchette entre les coulisses de la planche noire. On remet la planche noire dans l'appareil sur les tasseaux qui la tiennent inclinée à 45 degrés, le métal en dessous de manière qu'on puisse le voir à travers la glace, puis on ferme le couvercle de l'appareil très lentement, afin que l'air refoulé ne fasse pas voltiger des parcelles de mercure.

» Lorsque tout est ainsi disposé, on allume la lampe à esprit de vin que l'on place sous la capsule contenant le mercure, et on l'y laisse jusqu'à ce que le thermomètre, dont la boule plonge dans le mercure et dont le tube sort de la boîte, indique une chaleur de 60 degrés centigrades; alors on s'empresse de retirer la lampe : si le thermomètre a monté rapidement, il continue à s'élever sans le secours de la lampe, mais il faut observer qu'il ne doit pas dépasser 75 degrés.

» L'empreinte de l'image de la nature existe sur la plaque, mais elle n'est pas visible, ce n'est qu'au bout de quelques minutes qu'elle commence à paraître, ce dont on peut s'assurer en regardant à travers la glace, et en s'éclairant de la bougie dont on évitera de laisser trop long-temps frapper la lumière sur la plaque, parce qu'elle y laisserait des traces. Il faut laisser l'épreuve jusqu'à ce que le thermomètre soit descendu à 45 degrés; alors on la retire et cette opération est terminée.

» Lorsque les objets ont été fortement éclairés, et que l'on a laissé la lumière agir un peu trop long-temps dans la chambre noire, il arrive que cette opération est terminée avant même que le thermomètre soit descendu à 55 degrés, on peut s'en assurer en regardant à travers la glace.

» Il est nécessaire, après chaque opération, de bien essuyer l'intérieur de l'appareil pour en enlever la petite couche de mercure qui s'y répand généralement.

» Il faut aussi avoir bien soin d'essuyer la planche noire, afin qu'il n'y reste aucune apparence de mercure; lorsque l'on est forcé d'emballer l'appareil pour le transporter, il faut remettre dans le flacon le mercure qui est dans la capsule, ce qui se fait en inclinant la boîte pour la faire couler par le petit robinet qui est pratiqué à cet effet.

On peut regarder l'épreuve à un faible jour pour s'assurer qu'elle

a bien réussi. On la détache de la planchette en enlevant les quatre petites bandes métalliques qu'il faut avoir soin de nettoyer avec la ponce et un peu d'eau à chaque épreuve. On conçoit que ce nettoyage est nécessaire, puisque non-seulement ces petites bandes sont recouvertes d'une couche d'iode, mais qu'elles ont aussi reçues une partie de l'image. On place la plaque dans la boîte à coulisse jusqu'à ce qu'on puisse lui faire subir la cinquième et dernière opération qu'on peut se dispenser de faire immédiatement; car l'épreuve peut être conservé dans cet état pendant plusieurs mois sans qu'elle subisse d'altération; pourvu cependant qu'on évite de la regarder souvent et au grand jour.

SIXIÈME OPÉRATION. — *Laver la plaque.* — « Le but de la sixième opération est d'enlever à la plaque l'iode, qui autrement, lorsque l'épreuve serait exposée trop longtemps à la lumière, continuerait à se décomposer et la détruirait.

» Il faut, pour cette opération, de l'eau saturé de sel marin, ou une solution faible d'hyposulfite de soude pure; l'appareil (un plateau incliné); deux bassines en cuivre étamé; une bouillotte d'eau distillée.

» Pour enlever la couche d'iode, il faut prendre du sel commun qu'on introduit dans un bocal ou dans une bouteille à large ouverture; on en met jusqu'au quart de la hauteur de la bouteille, que l'on remplit avec de l'eau claire. Pour aider à fondre le sel, on agite de temps en temps la bouteille. Quand l'eau est parfaitement saturée, c'est-à-dire lorsqu'elle ne peut plus dissoudre de sel, il faut la filtrer au papier gris, afin qu'il n'y reste aucune ordure et qu'elle soit parfaitement limpide. On prépare d'avance cette eau saturée de sel en assez grande quantité, et on la conserve dans des bouteilles bouchées; on évite, par ce moyen, d'en faire à chaque épreuve.

» On verse dans l'une des bassines de l'eau salée jusqu'à peu près trois centimètres de sa hauteur; on remplit l'autre d'eau pure ordinaire. Ces deux liquides doivent être chauffés sans être bouillants.

» On peut remplacer la solution de sel marin par une solution d'hyposulfite de soude pure; cette dernière est même préférable parce qu'elle enlève entièrement l'iode, ce qui n'a pas toujours lieu avec la solution du sel marin, surtout lorsque les épreuves sont faites depuis longtemps. Du reste, l'opération est la même pour les deux solutions;

celle d'hyposulfite n'a pas besoin d'être chauffée, et il en faut une moins grande quantité puisqu'il suffit que la plaque en soit couverte dans le fond du bassin.

» On trempe d'abord la plaque dans l'eau pure contenue dans la bassine. Il faut seulement la plonger sans la quitter, et la retirer immédiatement; car il suffit que la surface de la plaque ait été couverte d'eau, puis, sans la laisser sécher, on la plonge de suite dans l'eau salée. Si on ne trempait d'abord la plaque dans l'eau pure avant de la plonger dans l'eau salée ou dans la solution d'hyposulfite, ces dernières y feraient des taches ineffaçables; pour faciliter l'action de l'eau salée ou de l'hyposulfite qui s'emparent de l'iode, on agite la plaque sans la faire sortir du liquide; au moyen du petit crochet en cuivre étamé que l'on passe en dessous de la plaque, on la soulève et on la laisse redescendre à plusieurs reprises. Quand la couleur jaune a tout à fait disparu, on enlève la plaque et on la prend par les deux extrémités en serrant les mains sur les épaisseurs, afin que les doigts ne touchent pas l'épreuve, on la plonge immédiatement dans la première bassine d'eau pure.

» On prend alors l'appareil et la bouillotte qui doit être très propre, et dans laquelle on a fait bouillir l'eau distillée. On retire la plaque de la bassine d'eau, et on la place ensuite sur le plateau incliné; puis, sans lui donner le temps de sécher, on verse sur la surface et par le haut de la plaque l'eau distillée très chaude, sans cependant être bouillante, de manière qu'en tombant cette eau forme une nappe sur toute l'étendue de l'épreuve, et entraîne avec elle toute la solution de sel marin ou d'hyposulfite, qui est déjà bien affaiblie par l'immersion de la plaque dans la première bassine. Il ne faut pas moins d'un litre d'eau distillée pour une épreuve de grandeur indiquée. Il est rare qu'après avoir versé cette quantité d'eau chaude sur l'épreuve, il n'en reste quelques gouttes sur la plaque. Dans ce cas, il faut s'empresser de faire disparaître ces gouttes avant qu'elles aient le temps de sécher, car elles pourraient contenir quelques parcelles de sel marin et même d'iode; on les enlève en soufflant fortement avec la bouche sur la plaque.

» On conçoit combien il est important que l'eau, dont on se sert pour ce lavage, soit pure; car, en se séchant sur la surface de la plaque, malgré la rapidité avec laquelle elle a coulé, si cette eau

contenait quelques matières en dissolution, il se formerait sur l'épreuve des taches nombreuses et ineffaçables.

» Pour s'assurer si l'eau peut convenir à ce lavage, on en verse une goutte sur une platine brunie, et si, en la faisant évaporer à l'aide de la chaleur, elle ne laisse aucun résidu, on peut l'employer sans crainte; l'eau distillée ne laisse aucune trace.

» Après ce lavage l'épreuve est terminée, il ne reste plus qu'à la préserver de la poussière et des vapeurs qui pourraient ternir l'argent. Le mercure qui dessine les images est en partie décomposé, il adhère à l'argent, il résiste à l'eau qu'on verse dessus, mais il ne peut soutenir aucun frottement.

» Pour conserver les épreuves, il faut les mettre sous verre et les coller; elle sont alors inaltérables même au soleil.

» Comme il est possible qu'on ne puisse en voyage s'occuper de l'encadrement des épreuves, on peut les conserver tout aussi bien en les enfermant dans une boîte de forme convenable. On peut pour plus de sûreté coller de petites bandes de papier sur les joints du couvercle.

» Il est nécessaire de dire que les planches d'argent plaqué peuvent servir plusieurs fois tant qu'on ne découvre pas le cuivre. Mais il est important d'enlever à chaque fois le mercure, comme il a été dit en employant la ponce avec l'huile, et en changeant souvent de coton; car autrement le mercure finit par adhérer à l'argent, et les épreuves que l'on obtient sur cet amalgame sont toujours imparfaites, parce qu'elles manquent de vigueur et de netteté.

SEPTIÈME OPÉRATION. — *Fixage au chlorure d'or.* — Il importe grandement, pour réussir, de suivre à la lettre le procédé inventé et décrit par M. Fizeau. On dissout 1 gramme de chlorure d'or dans un demi-litre d'eau pure et 3 grammes d'hyposulfite de soude : ou mieux 1 gramme de chlorure d'or dans 800 grammes d'eau, et 4 grammes d'hyposulfite de soude dans 200 grammes d'eau. On verse alors la dissolution d'or dans celle de soude, peu à peu et en agitant : la liqueur mixte, d'abord légèrement jaunâtre, ne tarde pas à devenir parfaitement limpide. Elle paraît consister en hyposulfite double de soude et d'or, plus du sel marin, qui ne paraît jouer aucun rôle dans l'opération.

L'épreuve étant encore toute iodée, mais exempte de poussière et

de corps gras sur les deux surfaces et les épaisseurs, on verse quelques gouttes d'alcool sur la surface iodée : quand l'alcool a humecté toute la surface, on plonge la plaque dans un bassin d'eau ; puis, de là, dans la dissolution d'hyposulfite. Cette solution doit être renouvelée à chaque épreuve et contenir environ une partie de sel pour quinze d'eau ; le reste du lavage s'effectue comme d'ordinaire, seulement l'eau de lavage doit être, autant que possible, exempte de poussière. L'emploi de l'alcool a eu simplement pour but de faire adhérer parfaitement l'eau à la surface de la plaque, et d'empêcher qu'elle ne se retirât sur les bords au moment des diverses immersions, ce qui produirait infailliblement des taches. Quand une épreuve a été lavée avec ces précautions, fut-elle fort ancienne, le traitement par le sel d'or est de la plus grande simplicité : il suffit de placer la plaque sur le châssis en fil de fer qui se trouve dans tous les appareils, de verser dessus une couche de sel d'or suffisante pour que la plaque en soit entièrement couverte, et de chauffer avec une forte lampe, en promenant celle-ci sur toutes les parties de la plaque. L'image commence d'abord par s'obscurcir ; elle s'éclaircit ensuite et prend, en une minute ou deux, une grande vigueur. Le dernier effet est toujours accompagné du dégagement de petites bulles. On verse alors le liquide ; on lave la plaque et l'on fait sécher.

Dans cette opération, de l'argent s'est dissous, et de l'or s'est précipité sur l'argent et sur le mercure, mais avec des résultats bien différents. En effet, l'argent qui, par son miroitage, forme les noirs du tableau, est, en quelque sorte, bruni par la mince couche d'or qui le couvre, d'où résulte un renforcement dans les noirs ; le mercure, au contraire, qui, à l'état de globules infiniment petits, forme les blancs, augmente de solidité et d'éclat par son amalgame avec l'or, d'où résultent une fixité plus grande et un remarquable accroissement dans la lumière de l'image.

MM. Fordos et Gélis ont récemment composé un sel d'or qui rendra un immense service aux voyageurs. Il suffit de dissoudre un gramme de ce sel dans un litre d'eau pour obtenir la liqueur nécessaire au fixage.

M. Gaudin, en outre du fixage, a trouvé le moyen de donner à l'épreuve une teinte plus ou moins foncée, qui ajoute quelquefois à l'effet produit. Faites dissoudre un gramme de chlorure d'or dans

un demi-litre d'eau ordinaire, et 30 grammes d'hyposulfite de soude dans un autre demi-litre d'eau ordinaire ; puis, versez la dissolution de chlorure d'or dans celle de soude, peu à peu et en agitant absolument comme pour la préparation de M. Fizeau. Versez dans une assiette, ou tout autre vase de même espèce, la quantité de liquide suffisante pour couvrir l'épreuve ; puis, après y avoir ajouté une goutte d'ammoniaque, plongez-y la plaque au sortir de la boîte à mercure, après en avoir essuyé le revers et les épaisseurs, et agitez rapidement de droite à gauche, de manière à dissoudre entièrement la couche d'iodure d'argent, comme à l'ordinaire. Dès que la plaque paraît blanche, on cesse tout mouvement rapide ; mais on continue de balancer légèrement l'assiette ; car si on la laissait en repos seulement quelques minutes, il se formerait des nuages sur l'épreuve. Peu à peu, la surface de la plaque prend une teinte jaune qui fonce de plus en plus, en tirant sur le bistre. On s'arrêtera à la couleur que l'on désire, et, quand l'épreuve aura été lavée et séchée, comme il a été dit, elle se trouvera fixée sans aucune tache, avec une surface limpide et un ton chaud extraordinaire. Si l'on augmentait la dose d'ammoniaque ou de chlorure d'or, l'opération irait plus vite ; mais le milieu de l'épreuve serait toujours plus clair que les bords. En s'arrangeant de manière à communiquer à l'assiette un mouvement continuel, l'épreuve, une fois immergée, se fixe toute seule : pendant ce temps-là, tout en faisant autre chose, on épie sa couleur, et, au bout de dix minutes ou d'un quart d'heure, on la sort du bain pour la sécher.

HUITIÈME OPÉRATION. — *Sécher la plaque.* — On la pose sur la fourchette de M. Brébisson, que l'on incline de manière à faire écouler le liquide par un des angles, tandis qu'on chauffe par dessous avec la lampe, en commençant par l'angle opposé. Il faut avoir soin de tenir la flamme toujours au-dessous de la ligne qui sépare la partie sèche de la partie encore mouillée ; quand la plaque est séchée à peu près aux trois quarts, on chauffe l'angle inférieur, et l'opération est terminée.

NEUVIÈME OPÉRATION. — *De la reproduction des épreuves par la galvanoplastie.* — Nous empruntons encore à M. Lerebours la description du procédé de M. Fizeaux : nous souhaitons que la facilité avec laquelle on opère actuellement détermine un grand nombre

d'amateurs à se livrer à ce genre de reproduction, qui donne de si beaux résultats. Signalons d'abord les précautions minutieuses dont l'inobservation pourrait compromettre la planche originale et sa copie.

Deux appareils sont nécessaires pour obtenir une reproduction : 1° une pile à un ou plusieurs éléments ; 2° une cuve en cristal pour contenir le sulfate de cuivre.

L'épreuve doit d'abord être entièrement débarrassée de toute trace d'hyposulfite, et il est indispensable qu'elle soit parfaitement fixée au chlorure d'or.

En général, on est toujours pressé de voir les progrès de l'opération : nous engageons à modérer ce désir, qui peut être fatal au résultat définitif; on devra toujours attendre assez longtemps avant de sortir l'épreuve du bain, et chaque fois que cela arrivera, on aura soin de ne la laisser qu'un instant au contact de l'air ; car quelques minutes suffisent pour oxider la surface au point d'empêcher le dépôt suivant d'adhérer au premier.

Lorsqu'on juge la couche métallique d'une épaisseur suffisante, et, en général, celle d'une forte carte suffit, on lave l'épreuve à grande eau, puis on la sèche, soit avec de la sciure de bois, soit avec du papier buvard. Si l'on tient à conserver la belle couleur rose-nacré que doit avoir le dépôt au sortir du bain, on hâtera sa dessication, en le mouillant, aussitôt après le lavage, avec de l'alcool qu'on épongera également avec du papier buvard.

La séparation du dépôt et de la plaque peut être accompagnée d'un accident qui les gâte tous deux. Il arrive parfois qu'une petite goutte de liquide séjourne inaperçue sous la cire qui recouvre les bords de la plaque, et qu'au moment où, avec la lame d'un couteau, on soulève le dépôt, cette goutte s'introduit dans l'espace capillaire formé par le soulèvement, et vient mouiller le dépôt et la plaque, qui sont infailliblement tachés, si le liquide contient encore du sulfate de cuivre.

Le procédé le plus sûr pour séparer les deux plaques consiste, lorsque le dépôt n'a pas trop d'épaisseur, à couper avec une paire de forts ciseaux une bande d'environ 2 millimètres de large sur tout le pourtour des deux pièces ; elles se séparent ensuite avec la plus grande facilité.

L'oxidabilité du cuivre étant beaucoup plus intense que celle de

l'argent, il faut soustraire le plus vite possible la contre-épreuve au contact de l'air, en la plaçant dans un passe-partout, et surtout bien se garder d'en toucher la surface avec quoi que ce soit.

La plus extrême propreté est, en outre, indispensable sur la surface de la plaque, si l'on veut éviter sur la copie la reproduction des poussières ou autres corps étrangers que la négligence de l'opérateur y aurait laissé adhérer.

Nous venons d'indiquer les conditions les plus essentielles; reprenons l'opération en détail. On avive la feuille de doublé par un de ses bords, ou même par un de ses angles, si c'est une petite plaque, et l'on réserve cette partie, exempte d'oxidation, pour l'appliquer sur le fil conducteur auquel vient aboutir, dans la cuve, le pôle positif (zinc) de la pile, et l'on maintient le tout avec une pince.

On recouvre ensuite d'une couche de vernis composé d'une partie d'essence de térébenthine et de deux parties de cire jaune, ou tout simplement de cire jaune, la face postérieure de la plaque, pour éviter un dépôt inutile de cuivre. Il faut avoir soin que cette couche de vernis, qui doit être appliquée à chaud, ait une certaine épaisseur et ne s'interpose pas entre la plaque et le conducteur de la cuve, car, autrement, elle détruirait le contact métallique indispensable au succès de l'opération.

On aura soin de bien filtrer le bain de sulfate de cuivre qui doit être saturé à froid.

Lorsque tout sera bien préparé, on mettra la plaque de cuivre qui doit se dissoudre dans la cuve en communication avec le pôle négatif de la pile, et on la plongera dans le bain.

On établira également la communication entre l'épreuve à reproduire et le pôle positif; et quand elle sera solidement attachée, à l'aide d'une ou plusieurs pinces, on la prolongera dans le bain; elle doit se recouvrir de cuivre immédiatement.

Quand l'opération que nous venons de décrire se fait avec la pile de Bunsen, un seul élément suffit; on la charge avec de l'acide nitrique pur à l'extérieur, et avec un mélange composé d'une partie d'acide sulfurique et de cinquante parties d'eau dans l'intérieur du vase poreux; en quelques heures, on peut obtenir ainsi la reproduction d'une grande épreuve de 16 centimètres sur 22. La dépense se réduit presque à la valeur du cuivre déposé; et lorsqu'on songe qu'avec une dépense aussi minime, on arrive, après un ou deux es-

sais, à reproduire et à multiplier, sans aucun risque, les plus belles images photographiques, qui sont toujours fort rares, avec un ton chaud et une perfection admirable ; lorsqu'on songe surtout que ce petit appareil peut servir à une foule d'autres applications, on est vraiment surpris qu'il ne soit pas plus connu.

De la dorure, de l'argenture et du cuivrage des épreuves daguerriennes.—Si, au lieu de reproduire les épreuves par la galvanoplastie, on veut seulement les dorer, les argenter ou les cuivrer, voici comment on devra procéder : 1° pour dorer, on remplace le sulfate de cuivre du bain par la liqueur de M. Fizeau, mélange de chlorure d'or et d'hyposulfite de soude, et on acidule très-faiblement le liquide, où plonge le zinc. Quelques minutes suffisent pour cette opération : il faut l'arrêter à temps ; car l'épaisseur trop grande de la couche effacerait successivement toutes les demi-teintes : les tons obtenus compris entre une légère teinte verdâtre et le jaune foncé, sont quelquefois très-heureux.

Pour argenter, on compose le bain de 10 grammes de nitrate d'argent pur et 25 grammes de cyanure de potassium par litre d'eau ordinaire. Cette opération donne à l'épreuve une douceur et un chatoiement d'un aspect fort agréable ; elle ramène au blanc les parties solarifiées, en lui enlevant cependant une partie de sa vigueur.

S'il s'agit de déposer sur la plaque du cuivre transparent, après avoir mis dans une capsule de porcelaine du sulfate de cuivre, on verse de l'ammoniaque de manière à le couvrir, et l'on chauffe jusqu'à l'ébullition avec une lampe à esprit-de-vin : le liquide saturé ainsi obtenu a la consistance d'une boue épaisse ; mais, avant de s'en servir, on y ajoute une solution concentrée de cyanure de potassium, jusqu'à ce qu'il soit devenu limpide et entièrement incolore. C'est là le bain qui doit servir à cuivrer ; on le met dans une cuve, on y plonge l'épreuve daguerrienne, et après l'avoir fait communiquer au pôle positif d'une batterie de trois ou quatre éléments de Bunsen, on promène en même temps au-dessus, pendant quelques secondes, en se gardant bien de trop l'en approcher, l'extrémité de l'autre conducteur, qui doit être terminé par une lame de platine ; on examine attentivement la teinte que prend l'épreuve ; on l'arrête quand elle a acquis la nuance voulue ; on la lave ensuite à l'eau distillée ; et, pour la préserver de toute oxidation, on peut la plonger quelques instants dans un bain d'or.

Dixième opération. — *Transformation de la plaque daguerrienne en planche propre à la gravure.* — *1° Procédé de M. Fizeau, décrit dans la brochure de M. Lerebours.* Le problème consistait essentiellement à traiter les images daguerriennes par un agent qui creusât les parties noires sans altérer les parties blanches du dessin; en d'autres termes, qui attaquât l'argent en présence du mercure sans altérer ce dernier.

Un acide mixte, composé avec les acides nitrique, nitreux et chlorhydrique (ces deux acides peuvent être remplacés par du nitrate de potasse et du sel marin), jouit précisément de cette propriété, laquelle appartient également à une dissolution de bichlorure de cuivre, mais d'une manière moins parfaite.

Lorsqu'on soumet une image daguerrienne dont la surface est bien pure à l'action de cet acide, surtout à chaud, les parties blanches ne sont pas altérées, tandis que les parties noires sont attaquées avec formation de chlorure d'argent adhérent, et dont la couche insoluble arrête bientôt l'action de l'acide.

Une dissolution d'ammoniaque, employée alors, entraîne cette couche de chlorure d'argent, et permet de soumettre de nouveau la planche à l'action du même acide, qui, agissant encore de la même manière, augmente la profondeur des parties noires. En répétant cette opération plusieurs fois, on parvient à transformer la planche daguerrienne en une planche gravée d'une grande perfection, mais généralement de peu de profondeur; de sorte que les épreuves imprimées sur le papier n'auraient pas la vigueur convenable.

A cette première opération, il a donc été nécessaire d'en ajouter une seconde, qui permît de creuser plus profondément les parties noires de l'image.

Cette seconde opération consiste à dorer les parties saillantes, ou les blancs de la planche gravée, et à laisser l'argent à nu dans les creux, ce qui permet d'en augmenter la profondeur par l'action d'un simple dissolvant de l'argent.

Pour obtenir ce résultat, la planche gravée peu profonde dont on vient de parler est graissée avec une huile siccative, de l'huile de lin, puis essuyée à la manière des imprimeurs en taille-douce; de cette manière, l'huile reste dans les creux seulement, et y forme un vernis qui ne tarde pas à sécher.

Dorant alors la planche par le procédé électro-chimique, on voit l'or se déposer sur toute la surface de la planche, excepté dans les parties creuses protégées par le vernis d'huile de lin : après ce dorage, l'huile de lin est enlevée par la potasse caustique.

Il résulte de là que la planche gravée a toutes ses parties saillantes protégées par une couche d'or.

Ses parties creuses, au contraire, présentent l'argent à nu.

Il est dès lors facile, en traitant la planche par l'acide nitrique, d'attaquer ces parties creuses seulement, et d'en augmenter ainsi à volonté la profondeur.

Avant ce traitement par l'acide nitrique, la planche dorée est recouverte par ce que les graveurs appellent un grain de résine, ce qui produit dans le métal attaqué les nombreuses irrégularités que l'on appelle grain de la gravure. Il résulte de ces deux opérations principales que la planche daguerrienne est transformée en une planche gravée tout à fait semblable aux planches gravées à l'aquatinte, et qu'elle peut dès lors, comme celles-ci, fournir par l'impression un nombre considérable d'épreuves.

Cependant, l'argent étant un métal peu dur, le nombre des épreuves serait encore assez limité, si un moyen très simple ne permettait de soustraire la planche photographique à l'usure déterminée par le travail de l'impression.

En effet, pour atteindre ce but, il suffit, avant de livrer la planche à l'imprimeur, de cuivrer sa surface par les procédés électro-chimiques : de cette manière, il est évident que la couche de cuivre supporte seule l'usure produite par le travail de l'ouvrier. Lorsque cette couche est altérée d'une manière notable, il est facile, à l'aide d'un acide faible, de la dissoudre en totalité ; dès lors la planche peut être cuivrée de nouveau, et se trouve dans le même état que si elle n'avait pas supporté le travail de l'imprimeur.

Les épreuves doivent être faites sur d'excellent plaqué au moins au dixième : il vaut mieux se contenter du polissage au tripoli. La plaque sera iodée et brômée comme à l'ordinaire : l'exposition à la chambre noire n'a rien de particulier, mais l'image doit être très fortement mercurée. Il est essentiel de garantir l'épreuve de toute lumière avant le lavage, qui doit être fait avec le plus grand soin et seulement avec de l'eau distillée.

Le procédé de M. Fizeau, brévеté, est la propriété de M. Lerebours. M. Hurlimann l'a mis en œuvre avec une habileté étonnante, il a réglé les opérations avec beaucoup de bonheur, et par de légères modifications, il a rendu le succès plus certain. Désormais, pour avoir une bonne gravure, il suffira d'avoir une planche irréprochable, ce qui n'est pas commun; quand cette condition sera remplie, on sera presque assuré de retrouver dans la gravure toutes les finesses de l'épreuve photographique.

Les personnes qui auraient de superbes épreuves fixées et qui voudraient les faire graver, devront les reproduire à loisir ou les faire copier au daguerréotype, ce sera cette reproduction que l'on fera graver.

Il est inutile d'insister sur l'importance de la découverte de la gravure pour l'entomologie les voyages, l'histoire naturelle et même les portraits.

Disons enfin que M. le duc de Luynes s'est aussi, l'un des premiers, occupé avec succès, de la gravure des images photographiques.

2° *Procédé de M. Grove.* L'essence du procédé de M. Grove, bien différent de celui de MM. Berres et Fizeau, consiste à faire que l'image daguerrienne, étant placée au pôle négatif de la pile et plongée en même temps dans un liquide, ce liquide, sous l'action du courant, attaque inégalement l'argent et le mercure de la plaque et y grave en creux les dessins tracés par la lumière solaire : nous allons décrire le mode d'opérer définitivement adopté par lui. Dans un bâti en bois, on a pratiqué deux rainures placées à 5 millimètres de distance l'une de l'autre, et dans lesquelles on a glissé : 1° la plaque qu'il s'agit de graver, 2° une plaque de platine de même dimension. Pour assurer une évolution prompte et égale de l'hydrogène, cette dernière a été platinée d'après la méthode de M. Smee; car si l'hydrogène adhérait en un point quelconque du cathode, les portions opposées de l'anode éprouveraient proportionnellement une moindre action. Le dos et les bords de la plaque daguerrienne ont été vernis avec une solution de gomme laque qu'on a grattée sur un des bords, pour permettre d'établir le contact métallique. Le bâti de bois, avec ses deux plaques, est ensuite placé dans un vase de verre ou de porcelaine rempli d'une solution de deux mesures d'acide chlorydique et une d'eau distillée; et deux fils forts, en platine, partis des pôles de la pile formée par un seul élément de Grove à acide nitrique,

sont mis en contact avec les bords des deux plaques : un des expérimentateurs compte alors le temps qui, en général, ne doit pas excéder 30 secondes. Lorsque la plaque ainsi traitée a été enlevée de l'acide, on la lave à l'eau distillée ; et si le métal est homogène, elle présente un beau dessin, couleur de terre de Sienne, de l'image originale, produit par des molécules de l'oxichlorure qui s'est formé. On la place alors sur un plat contenant une très faible solution d'ammoniaque, et la surface en est doucement frottée avec du coton très mou, jusqu'à ce que le dépôt soit dissous : aussitôt que *cela est effectué*, on enlève immédiatement la plaque, on la plonge dans l'eau distillée, et on la sèche avec soin. Le procédé est actuellement complet, et l'on a obtenu une gravure parfaite au trait, du dessin original. Quand on imprime avec cette plaque, elle donne une image positive, qui a ses lumières et ses ombres comme dans la nature, et qui, sous un autre rapport, est plus correcte que l'image daguerrienne : les objets n'y sont pas renversés : s'il s'agit de caractères, on les lit directement ; et dans les portraits ainsi pris, les côtes droit et gauche de la figure sont dans une position convenable. Il y a toutefois cette difficulté, relativement à la gravure des images daguerriennes, c'est que, si les plaques sont gravées à une profondeur suffisante pour une bonne impression, quelques-unes des lignes les plus fines de l'original doivent nécessairement empiéter les unes sur les autres, et ainsi la beauté principale de ces admirables images se trouve détruite. D'un autre côté, si l'action de la pile n'a été prolongée qu'autant qu'il fallait pour obtenir seulement une gravure exacte du dessin original, ce qu'on peut faire, du reste, avec la plus rigoureuse perfection, le seul nettoyage de la plaque par l'imprimeur détruit aussitôt toute sa beauté ; et parce que les molécules de l'encre d'imprimerie surpassent en dimensions la profondeur du trait, l'impression est forcément très imparfaite. Il faut conclure de ces inconvénients trop réels que le parti le plus avantageux à tirer de ce procédé, pour le moment, consiste à s'en servir pour multiplier indéfiniment les images daguerriennes, au moyen de la galvanoplastie. Une image daguerrienne ordinaire, quand on la soumet au procédé galvanoplastique, laisse une bien faible impression, et en la traitant ainsi, elle est trop souvent détruite : l'impression ne peut être continuée longtemps avec une semblable plaque, tandis que lorsqu'elle provient

d'une planche gravée, comme il vient d'être dit, au pôle négatif de la pile, elle admet le tirage d'un très grand nombre d'exemplaires. Pour donner une idée de la parfaite exactitude de cette méthode, nous dirons que, dans une des reproductions de M. Grove, on voyait sur la plaque galvanoplastique un écusson de 2 millimètres 5, sur 1 millimètre 5, sur lequel il y avait cinq lignes d'inscription qu'on lisait au microscope de la manière la plus distincte. Les avantages du procédé voltaïque sur le procédé chimique pour la gravure des images daguerriennes paraissent être les suivants :

1° Avec le premier, on peut varier indéfiniment la nature des liquides employés ou menstrues ; on peut essayer tour à tour des solutions d'acides, d'alcalis, de sels, plus spécialement de sels de la classe haloïde, tels que les sulfures, les cyanures; etc.; plus généralement, toute substance qui peut être dégagée par l'électrolysation peut être employée pour agir sur la plaque ;

2° L'action est généralisée, et les courants voltaïques locaux sont évités ;

3° Le temps de l'opération peut être déterminé exactement, et on peut produire un trait de telle profondeur qu'on désire ;

4° Le procédé peut être arrêté à une époque quelconque, et être repris et renouvelé aussi souvent qu'on le désire.

Le temps ci-dessus indiqué a été calculé pour des expériences faites avec un couple de la pile à acide nitrique ; il n'est pas, néanmoins, absolument nécessaire de faire usage de cette pile : il est probable que toute autre forme ou combinaison ne sera pas moins efficace. Il serait plus convenable même peut-être d'employer une pile à diaphragme ou une pile produisant un courant constant, attendu qu'autrement le temps nécessaire à l'opération ne pourrait pas être fixé d'avance aussi exactement. Il est indispensable que l'argent des plaques soumis à ce procédé soit homogène ; s'il n'en était pas ainsi, l'image daguerrienne se couvrirait instantanément de mille stries confuses produites par l'action chimique.

M. Grove a présenté à la société royale de Londres quelques spécimens très beaux de plaques gravées préparées par son procédé, ainsi que des copies galvano-plastiques fort remarquables : il a fait parfaitement ressortir tout ce qu'offrent d'étonnant ces curieuses actions des agents impondérables sur les corps pondérables. C'est un

nouvel art, dit-il, dans lequel, au lieu d'une plaque dessinée par un artiste et gravée au burin par un graveur habile, on a une plaque dessinée par la lumière solaire et gravée par l'électricité.

On peut faire subir encore à la plaque daguerrienne quelques opérations secondaires que nous décrirons rapidement.

1° *Coloriage des plaques daguerriennes.*—Cette opération, au fond, est par trop barbare; faire enluminer même par un artiste habile une belle épreuve photographique, c'est, disait M. Arago, faire retoucher les ailes d'un papillon ou une miniature de Petitot ou de madame de Mirbel par un peintre d'enseignes. Nous aurions donc passé sous silence les nombreux essais faits dans cette direction, si nous n'avions pas appris que M. Bœttger, de Francfort, un des manipulateurs de l'Europe les plus savants et les plus adroits, était parvenu à des résultats merveilleux qui ne laissent rien à désirer. Ses curieux procédés sont encore enveloppés de mystère, et nous savons que M. Bœttger a invité, par l'intermédiaire des journaux, les amateurs de daguerréotypie à s'adresser à lui, promettant de leur faire connaître les conditions auxquelles il leur révèlera sa méthode. Ce qu'il y a de certain, c'est que les couleurs des épreuves obtenues par M. Bœttger surpassent en vivacité et en transparence tout ce qu'on pourrait imaginer.

2° *Transport sur papier des épreuves daguerriennes.* — Cette opération est moins absurde : on décalque sur papier les inimitables reflets des ailes des papillons, et les collections ainsi obtenues sont précieuses encore : on peut donc vouloir transformer de la même manière les épreuves daguerriennes. Pour y parvenir, appliquez au pinceau une couche bien égale de solution gélatineuse assez forte sur une feuille de papier noir et faites-la sécher. Lorsque vous voulez décalquer une épreuve, faites tremper dans de l'eau froide un morceau de ce papier préparé, jusqu'à ce que la gélatine soit ramollie, et placez la avec soin sur la plaque, puis recouvrez de plusieurs feuilles de papier brouillard ; sur ces dernières, posez une planchette bien dressée, et soumettez l'ensemble à une pression modérée, jusqu'à ce qu'il soit bien sec : en enlevant alors le papier avec soin, vous y trouverez l'empreinte fidèle de l'épreuve métallique.

CALOTYPIE OU ÉPREUVES PHOTOGRAPHIQUES SUR PAPIER.

Il est certain pour nous que, dès 1838, M. Bayard, employé au

ministère des finances, avait obtenu de bonnes épreuves photographiques sur papier. En 1839, l'Académie des Beaux-Arts signalait en ces termes sa belle découverte : « D'après les détails où nous venons d'entrer, l'Académie, qui a déjà su apprécier le mérite des dessins de M. Bayard, est aussi à même de juger par quels degrés de perfectionnement a passé dans un si court espace de temps, un procédé qui ne peut être encore arrivé à sa dernière expression.... Les épreuves dues à ce procédé sont produites sur papier au moyen d'une préparation qui en constitue en grande partie tout le secret... Les dessins ainsi produits jouissent, du moment qu'ils ont été fixés par un lavage, de la propriété de se conserver comme les dessins à l'aquarelle; ils peuvent se porter en voyage, se classer dans un album, etc... Il suffit, pour qu'ils gardent leur vigueur, qu'ils ne soient point exposés à l'effet direct d'une lumière trop vive... Les images sont en sens direct.

Le papier de M. Bayard semble avoir sur les papiers anglais l'incomparable avantage, de donner de suite l'image dans son véritable sens. Le papier Talbot donne d'abord l'image inverse ou négative, c'est-à-dire que les noirs ont pris la place des blancs, et ce n'est que par un contre-calque qu'on obtient l'image directe ou positive.

Les images sur papier ont pour certains objets d'art un bien plus grand charme que les images daguerriennes sur plaque métallique. Les remarquables effets obtenus par MM. Bayard et Talbot ne peuvent laisser aucun doute à cet égard. Peut-être même arrivera-t-on, en augmentant la rapidité de l'opération, à faire ainsi de délicieux portraits et des vues d'un très bel effet. Mais, pour tous les objets qui demandent surtout et avant tout une grande finesse de détail, jamais le papier ne pourra lutter avec les plaques de doublé; sa texture fibreuse sera toujours un obstacle insurmontable à ce genre de reproduction.

Il est vivement à regretter que M. Bayard n'ait pas encore pu révéler son secret, dont la divulgation est attendue avec une vive impatience; sans doute qu'il est à la recherche de perfectionnements nouveaux, ou qu'il attend qu'une occasion favorable lui fasse tirer un parti avantageux de sa brillante invention.

Après cet hommage rendu à un compatriote, nous devons reconnaître hautement que la gloire des procédés photographiques sur

papier appartient à M. Talbot. Dans un mémoire lu à la Société royale de Londres, il raconte longuement l'histoire de sa découverte ; nous la résumerons fidèlement.

Au printemps de 1834, M. Talbot conçu l'idée d'appliquer à l'art du dessin la propriété reconnue au nitrate d'argent de se colorier au contact des rayons violets de la lumière. Chose singulière, M. Talbot ignorait alors les nobles essais de Wedgewood ; il n'avait pas lu la note publiée par ce savant de concert avec l'illustre Davy ; cette ignorance le servit grandement, car il avoue naïvement que l'insuccès du grand maître l'aurait découragé, et qu'il aurait abandonné, comme chimériques, ses premières recherches, s'il n'était pas parvenu à fixer l'image produite par l'action de la lumière, avant d'avoir connu l'espèce d'impossibilité proclamée par sir H. Davy. Il continua donc ses expériences ; et après s'être assuré pendant de longues années que ses dessins, en très grand nombre, n'éprouvaient plus du temps et de la lumière aucune altération, il se décidait à produire sa découverte au grand jour, quand il fut tout à coup prévenu par M. Daguerre.

Les images obtenues sur le papier préparé au nitrate d'argent sont blanches par elles-mêmes ; mais le fond sur lequel on les obtient est diversement et agréablement coloré. Telle est la variété dont ce procédé est susceptible, qu'en changeant seulement les proportions et quelques détails de manipulation, on peut aisément obtenir les couleurs suivantes : bleu de ciel, jaune, rose, brun de diverses nuances, noir : la variété bleue est d'un effet charmant ; toutes ces nuances sont des combinaisons chimiques différentes, mais que les chimistes n'ont pas jusqu'ici suffisamment distinguées.

Les premiers objets auxquels l'auteur appliqua sa méthode furent les plantes de son herbier ou des plantes fraîches, qu'il parvint à représenter avec les nervures des feuilles, les poils des diverses parties du végétal, etc., etc. Ayant un jour reproduit l'image d'une dentelle d'un dessin assez compliqué, il la montra à plusieurs personnes à la distance de quelques pieds, et leur demanda si la ressemblance n'était pas parfaite ; personne ne voulut croire que ce fût un dessin.

La beauté des images déjà obtenues par M. Talbot lui faisait vivement regretter leur destruction subséquente par l'action continuée de la lumière, et il résolut de tenter de nouveaux efforts,

dans le but de parvenir à les conserver. Il remarqua que le nitrate d'argent noirci par la lumière n'est plus le même corps chimique, et il en conclut que, si une peinture produite par les rayons solaires est ensuite soumise à l'action de divers réactifs, la partie colorée et la partie blanche subiront des influences différentes : on pouvait donc espérer qu'on rencontrerait enfin un réactif dont l'emploi, en arrêtant l'action produite par la lumière, conserverait les différences de teintes qui séparent les portions impressionnées de celles qui ne l'ont pas été. Les espérances de M. Talbot furent bientôt couronnées de succès ; il découvrit presque simultanément deux procédés préservateurs d'une efficacité absolue : le papier, autrefois si sensible à la lumière, lui devint tellement indifférent, qu'exposé pendant une heure aux rayons d'un soleil ardent, il ne perdait rien de sa blancheur. Ainsi se trouva résolu le merveilleux problème de fixer d'une manière permanente l'ombre même, c'est-à-dire ce qu'il y a de plus fugitif dans la nature.

Suivant, sans le savoir, les traces de Wedgewood et de Davy, M. Talbot fit d'abord des portraits en silhouettes d'une admirable netteté ; plus tard, il copia les vitraux peints, reproduisit les images formées au foyer du microscope solaire, et aborda enfin le grand problème de la reproduction des tableaux donnés par la chambre obscure. Il était alors arrivé à préparer un papier si sensible, qu'il ne fallait pas plus d'une seconde pour obtenir, sous l'action des rayons solaires, une image complète : le dessin était aussitôt achevé que commencé. M. Talbot donc construisit avec une grande boîte une sorte de chambre obscure, la plaça vis-à-vis d'un bâtiment bien éclairé, et fit tomber sur son papier sensible l'image donnée par une bonne lentille ; au bout d'une heure, il avait conquis le dessin tant désiré : le bâtiment avait laissé la trace fidèle de tous ses contours. Une heure, c'était bien long ; M. Talbot s'aperçut plus tard qu'avec des lentilles à court foyer, il réduirait dans une proportion énorme le temps nécessaire à la formation de l'image. Il se mit alors à l'œuvre avec une ardeur toute nouvelle ; il reproduisit sous toutes ses formes la maison de campagne qu'il habitait, et dont l'antique et belle architecture se prêtait à de magnifiques effets : il se livrait à des transports de joie en pensant que sa maison était la première qui eut fait son portrait. Hélas ! depuis longtemps, il avait été devancé par Niepce

et Daguerre. Les dessins par lui obtenus semblaient, ce sont ses propres paroles, l'ouvrage d'un Raphaël invisible; ils étaient parfaits de détails, et la loupe accroissait leur netteté. Des statues et des bas-reliefs éclairés d'une forte lumière se peignirent aussi sous ses yeux. Enfin, il arriva à copier des dessins, des gravures et même des manuscrits. Pour cela, il mettait l'objet à reproduire en contact intime avec le papier préparé, et exposait cet ensemble aux rayons éclatants du soleil. Il copia de cette manière des gravures précieuses, d'un fini achevé, et chargées de petites figures : chacun des détails *était rendu* avec une inimitable précision. La copie ainsi obtenue laissait cependant beaucoup à désirer; elle était l'inverse de l'original : les ombres avaient pris la place des clairs, et *vice versâ*. Il fallait donc faire un pas de plus, et reproduire à leur place les clairs et les ombres. M. Talbot y parvint, en rendant inaltérable à la lumière l'image inverse de l'objet, et s'en servant comme il avait fait d'abord du dessin original; la seconde image obtenue remplissait toutes les conditions voulues, et la solution du problème ne laissait absolument rien à désirer.

M. Talbot publia de bonne heure tous les secrets de son ingénieuse méthode; mais quoiqu'on sut qu'en Angleterre elle avait donné des résultats merveilleux, elle fixa à peine l'attention en France : très-peu de personnes s'en occupèrent; quelques essais infructueux firent même croire qu'il y avait au fond de l'opération, telle qu'elle se pratiquait, une cause permanente et inévitable d'insuccès; et, malgré l'intérêt qu'elle offrait sous le double rapport des arts et de l'industrie, cette nouvelle branche de la photographie était presque complétement oubliée parmi nous, lorsqu'au commencement de cette année, un amateur de Lille, M. Blanquart-Everard, l'a comme arrachée au tombeau. C'était bien une résurrection, mais le mort ne fut reconnu de personne : on crut partout en France à une découverte nouvelle, on l'exalta grandement; et cependant, M. Blanquart-Everard n'a fait absolument que reproduire avec plus de détails la méthode de M. Talbot, sans daigner cependant le nommer, sans soulever aussi à l'Académie aucune réclamation. Ce fait singulier est peut-être inouï dans la science, et il a fort indigné nos voisins d'outre-mer. C'était un devoir pour nous, avant de décrire les procédés de M. Blanquart-Everard, que de protester en faveur de M. Talbot. Le savant physi-

cien anglais est assez malheureux d'avoir été devancé par M. Daguerre, pour qu'on doive au moins lui épargner cette fois l'injuste oubli de ses droits.

PROCÉDÉS DE LA LOTYPIE. — L'opération se divise en deux parties : la première doit donner l'épreuve négative, dans laquelle les parties éclairées sont représentées par les noirs et, *vice versâ*.

Épreuve négative. — « Pour cette épreuve, on fera choix d'un papier de la force des plus beaux papiers à lettre glacés, de la plus belle pâte possible. Je me suis trouvé très-bien de celui de M. Marion, marqué n° 10.

» 1° On versera dans une cuvette une dissolution de 1 partie de nitrate d'argent et 30 parties d'eau distillée (toutes les parties sont désignées au poids), sur la surface de laquelle on déposera le papier, en ayant soin de ne pas enfermer de bulles d'air entre la masse du liquide et le papier (cette recommandation s'applique à toutes les préparations ultérieures); après qu'il sera resté une minute sur ce bain, on retirera le papier, en le faisant égoutter par un des angles, puis on le déposera à plat sur une surface imperméable, telle qu'un meuble verni, une toile cirée, etc. etc. , le laissant ainsi sécher lentement, et ayant soin d'éviter tout dépôt de liquide par place, ce qui serait une cause de tache aux épreuves.

» Dans un autre vase où l'on aura versé une dissolution de 25 parties d'iodure de potassium, 1 partie de brômure de potassium et 260 parties d'eau distillée, on plongera entièrement ce papier pendant une minute et demie, ou deux minutes s'il fait froid, en laissant au-dessus le côté nitraté ; on le retirera de ce bain en le prenant par deux coins et on le passera, sans le lâcher, dans un vase plus grand rempli d'eau distillée, afin de le laver et enlever tout dépôt cristallin qui pourrait, sans cela rester à la surface ; puis, sur un fil qu'on aura tendu horizontalement à cet effet, on suspendra le papier, en faisant une corne à l'un des coins, et on le laissera ainsi séjourner et sécher complétement.

» Ce papier, ainsi préparé, sera recueilli dans une boîte de carton à l'abri de la lumière, et s'il n'est pas tassé fortement, il pourra se conserver pendant des mois entiers. On peut ainsi, dans une seule journée, préparer le papier nécessaire à une excursion de plusieurs mois. On recueillera les excédents des liquides dans des flacons recouverts de papier noir : ils pourront servir jusqu'à épuisement.



» Lorsqu'on voudra prendre une épreuve, on versera sur une glace bien plane et bien calée sur un support qu'elle débordera, quelques gouttes d'une dissolution de 6 parties de nitrate d'argent, 11 parties d'acide acétique cristallisable et 64 parties d'eau distillée; on ne prendra que la moitié de la quantité d'eau pour dissoudre le nitrate, on versera ensuite l'acide acétique et, après, une heure de repos, on y ajoutera la seconde partie d'eau.

» On y déposera le papier du côté qui aura été soumis, dans la première préparation, à l'absorption du nitrate d'argent; on étendra avec la main le papier, de manière que, bien imbibé partout de la dissolution, il adhère parfaitement à la glace, sans laisser de plis ni de bulles d'air. Ceci fait, on le couvrira de plusieurs feuilles de papier bien propres, trempées à l'avance dans l'eau distillée (une seule pourrait suffire si l'on avait un papier d'une très-grande épaisseur); sur ces feuilles de papier trempées, on déposera une seconde glace de la même dimension que la première, et l'on pressera fortement dessus, pour ne former qu'une seule masse; on déposera le tout dans un châssis de la chambre noire qu'on aura préalablement fait disposer à cet effet, et l'on ira ensuite procéder à l'exposition, comme si le châssis renfermait une plaque daguerrienne.

» Cette préparation exige une durée d'exposition qui pourra être calculée par les daguerréotypeurs au quart de celle nécessaire pour les plaques préparées au chlorure d'iode; ils tiendront compte toutefois de la température, et remarqueront qu'elle est une cause d'accélération non moins puissante que l'intensité lumineuse.

» L'exposition terminée, on déposera l'épreuve sur un plateau de verre ou de porcelaine, qu'on aura légèrement mouillé, afin que le papier y adhère plus facilement; on versera dessus une dissolution saturée d'acide gallique : à l'instant, l'image apparaîtra. On laissera agir l'acide gallique, afin que la combinaison soit plus profonde dans le papier et que tous les détails arrivent dans les parties des clairs-obscurs; mais on arrêtera toutefois l'action de l'acide gallique avant que les blancs qui doivent former les noirs de l'épreuve positive n'éprouvent de l'altération.

» A cet effet, on lavera l'épreuve, en versant de l'eau dessus, pour la débarrasser de l'acide gallique.

« Puis, la déposant de nouveau sur le support, on y versera une

couche d'une dissolution de 1 partie de bromure de potassium et de 40 parties d'eau distillée, qu'on laissera dessus pendant un quart d'heure, en ayant bien soin qu'elle soit toujours couverte.

» Après quoi on lavera l'épreuve à grande eau et on la sèchera entre plusieurs feuilles de papier buvard. Elle sera alors achevée et pourra donner un nombre considérable d'épreuves positives, après que, pour la rendre plus transparente, on l'aura imbibée de cire en râpant une petite quantité sur le papier et la faisant fondre, avec un fer à repasser, à travers plusieurs feuilles de papier à lettre, qu'on renouvellera suffisamment, afin d'enlever tout dépôt de cire à la surface de l'épreuve.

Épreuve positive. — » On fera choix, pour cette épreuve, du papier de la plus belle pâte, le plus épais possible et parfaitement glacé.

» Dans un vase où l'on aura versé une solution de 3 parties d'eau saturée de sel marin dans 10 parties d'eau distillée, on déposera la feuille de papier sur une seule surface et on l'y laissera jusqu'à ce qu'elle s'aplatisse parfaitement sur l'eau (2 ou 3 minutes); on la sèchera sur du papier buvard, en passant fortement à des reprises répétées, dans tous les sens, la main sur le dos du papier, et renouvelant le papier buvard jusqu'à ce qu'il n'accuse plus aucune humidité fournie par le papier salé.

» Il sera alors déposé sur un autre bain, composé d'une solution de 1 partie de nitrate d'argent et de 5 parties d'eau distillée ; on l'y laissera tout le temps qu'exigera l'assèchement, comme il vient d'être dit, d'une seconde feuille de papier, qui aura remplacé la première sur le bain salé ; alors, ôtant celle du bain d'argent, on l'égouttera avec soin par un de ses angles et on la déposera sur une surface imperméable, comme pour la première préparation du papier négatif. On voit qu'en passant ainsi le papier du bain salé au bain d'argent, le préparateur ne perd pas une minute, et qu'il peut, en quelques heures, préparer une assez grande quantité de papier.

» Parfaitement sec, on l'enfermera dans une boîte ou carton, sans le tasser ; il sera bon de n'en pas préparer pour plus de huit à quinze jours à l'avance ; car, au bout de ce laps de temps, il se teinte, et quoique propre encore à la reproduction des images, il n'accuse plus es blancs avec le même éclat que lorsqu'il est nouvellement préparé.

» Pour faire venir une épreuve positive, on placera l'épreuve né-

gative du côté imprimé, sur la surface préparée du papier positif; on pressera les deux papiers réunis entre deux glaces qu'on déposera sur un châssis (planche rebordée) couvert d'un drap noir. On aura soin que la glace du dessus soit assez forte et assez lourde pour que son poids fasse pression sur l'épreuve négative, de manière qu'elle soit parfaitement adhérente au papier positif. Ceci fait, on exposera à la grande lumière, au soleil autant que possible, en cherchant à faire tomber ses rayons à angle droit sur la glace. Pour avoir de belles épreuves, il faut pousser cette exposition à son degré extrême : elle devra être arrêtée avant que les vives lumières de l'image puissent être altérées; il suffira d'une seule expérience pour déterminer approximativement le temps d'exposition, qui sera, terme moyen, de 20 minutes au soleil, selon la vigueur de l'épreuve négative.

» Après cette exposition, on rentrera l'épreuve dans le cabinet noir, et, quelle qu'elle soit, on la laissera tremper un quart d'heure dans un bain d'eau douce, puis dans un autre d'hyposulfite de soude, formé de 1 partie d'hyposulfite de soude et de 8 parties d'eau distillée. A partir de ce moment, on pourra la regarder au jour et suivre l'action de l'hyposulfite ; on verra alors les blancs de l'épreuve prendre de plus en plus de l'éclat ; les clairs-obscurs se feuilleront ; la nuance de l'épreuve, d'un vilain ton roux et uniforme, passera à la belle nuance brune, puis au bistre, puis, enfin, au noir des gravures de l'aqua-tinta. L'opérateur arrêtera donc son épreuve au ton et à l'effet qui lui conviendront. Elle sera parfaitement fixée ; mais afin de la dégager de l'hyposulfite, dont l'action se prolongerait, on la lavera à grande eau, après quoi on la laissera dans un grand vase rempli d'eau pendant tout un jour, ou au moins cinq à six heures ; on sèchera ensuite entre plusieurs feuilles de papier buvard.

» Ce bain, comme celui d'hyposulfite, peut recevoir en même temps autant d'épreuves que l'on voudra.

» Les épreuves qui ne pourraient supporter l'action de l'hyposulfite, au moins pendant deux heures, devront être rejetées : ce serait une preuve qu'elles n'auraient point été exposées assez longtemps à la lumière, et elles ne seraient pas suffisamment fixées.

» Quelque compliquées que puissent paraître les préparations ci-dessus décrites, on les reconnaîtra excessivement faciles lorsqu'on sera

à l'œuvre, et si on les compare aux préparations des plaques, on sera étonné de leur simplicité.

« L'avantage de pouvoir préparer à l'avance le papier des épreuves négatives facilitera singulièrement les excursions daguerriennes, en dispensant l'amateur d'un bagage toujours fort embarrassant, et en lui économisant le temps et le travail qu'exige le polissage des plaques, qui ne peut être fait à l'avance. La facilité de ne faire venir les épreuves positives qu'au retour d'un voyage, et de les multiplier à l'infini, ne contribuera pas peu au développement de cette branche de photographie, qui réclame aussi la sympathie des artistes, puisque les résultats ne sont point, comme sur le plaqué, en dehors de leur action, et qu'ils peuvent, au contraire, les modifier au gré de leur imagination.

« Ainsi, la facilité d'exécution, la certitude de l'opération, l'abondante reproduction des épreuves, voilà trois éléments qui doivent, dans un temps prochain, faire prendre à cette branche de photographie une place importante dans l'industrie ; car si elle est appelée à donner à l'homme du monde des souvenirs vivants de ses pérégrinations, des images fidèles des objets de ses affections, elle procurera aux savants des dessins exacts de mécanique, d'anatomie, d'histoire naturelle ; aux historiens, aux archéologues, aux artistes, enfin, des vues pittoresques, des études d'ensemble et de détail des grandes œuvres de l'art antique et du moyen âge, dont les rares dessins ne sont le partage que du petit nombre. »

Un grand nombre de savants ou d'amateurs se sont élancés, comme M. Blanquart-Evrard, sur les traces de MM. Talbot et Bayard ; MM. Herschel, Hunt, Grove, etc., ont produit tour à tour des recettes nouvelles pour la préparation des papiers impressionnables, qu'ils ont baptisés de noms extraordinaires : énergiatype, chrysotype, chromatype, etc., etc. Nous n'enregistrerons pas ici ces procédés divers, parce qu'ils n'ont pas été convertis en méthode parfaitement définie, complète et infaillible.

THÉORIE DE LA FORMATION DES IMAGES DAGUERRIENNES. — La toile du tableau qui reçoit les images est donc une couche d'iode plus ou moins modifiée par la présence des substances accélératrices. L'expérience suivante, de M. Dumas, prouve que cette couche est infiniment mince. Une plaque de 5,750 millimètres carrés de surface,

ayant été amenée à la nuance jaune paille par son exposition à la vapeur d'iode, fut placée sur une balance très délicate; il y avait une augmentation de poids certaine, évidente; mais elle ne s'élevait pas à un demi milligramme. Quand la nuance fut jaune d'or, l'augmentation de poids arriva à un demi-milligramme. En prolongeant la durée de l'action, en la quadruplant, par exemple, le poids obtenu fut de deux milligrammes. On peut supposer que le quart de cette quantité aurait suffi pour former sur toute la surface la dose d'iodure nécessaire à la production de l'image. Or, si en partant de ce poids, on calcule le volume correspondant de l'iodure d'argent, on arrive à cette conclusion que l'épaisseur de la couche n'est pas égale à un millionième de millimètre.

Quand la plaque sort de la chambre obscure, on n'y voit absolument aucun trait; la couleur jaunâtre d'iodure d'argent, qui a reçu l'image, paraît encore d'une nuance parfaitement uniforme dans toute son étendue; l'action exercée par la lumière n'aurait-elle eu d'autre effet, comme le croit M. Dumas, que de fendiller ou soulever la couche d'iodure d'argent, ce qui permettrait au mercure d'arriver au contact de l'argent métallique, tandis que l'iodure non modifié resterait imperméable. Le mercure, en effet, s'attache en abondance aux parties de la surface de la plaque qu'une vive lumière a frappées; elle laisse intactes les régions restées dans l'ombre, et se condense sur les espaces qu'occupaient les demi-teintes en quantité plus ou moins grande, suivant que, par leur intensité, ces demi-teintes se rapprochaient plus ou moins des parties claires ou des parties noires. En s'aidant de la faible lumière d'une chandelle, l'opérateur peut suivre pas à pas la formation graduelle de l'image; il peut voir la vapeur mercurielle, comme un pinceau de la plus extrême délicatesse, aller marquer du ton convenable chaque partie de la plaque. Vue au microscope, la couche de mercure se présente comme formée de grains très petits d'un huit centième de millimètre de diamètre; les parties blanches en sont toutes couvertes; les demi-teintes sont moins garnies, les ombres n'en prennent presque pas : M. Dumas croit que cette couche est seulement du mercure en poudre, simplement déposé à la surface de l'argent, mais non amalgamé. Quand l'image est produite, on doit empêcher que la lumière du jour ne l'altère. On y parvient en agitant la plaque dans l'hypo-

sulfite de soude. Après le lavage, la plaque montre à la surface un peu d'amalgame, et pèse cependant moins qu'avant de commencer l'opération ; elle a donc perdu un peu d'argent, séparé par le mercure et entraîné par l'hyposulfite. L'examen chimique du liquide montre qu'il en est réellement ainsi.

Voici donc comment, en se plaçant au point de vue choisi par M. Dumas, s'expliquerait la formation des images. La lumière fendillerait, ou même vaporiserait l'iode partout où elle frappe la couche dorée ; là, le métal est mis à nu ; la vapeur mercurielle agit librement sur les parties dénudées et y produit un amalgame blanc et mat. Le lavage à l'hyposulfite a pour but, chimiquement, l'enlèvement des parties d'iode dont la lumière n'a pas produit le dégagement ; artistiquement, la mise à nu des parties miroitantes qui doivent faire les noirs. Plus tard, le fixage au chlorure d'or a pour but de couvrir la plaque daguerrienne d'une couche d'or d'une minceur excessive qui augmente les vigueurs et les lumières, et qui la rend ineffaçable sans altérer le moins du monde sa netteté.

Pénétrant plus avant, MM. Choiselat et Ratel ont voulu tout expliquer par des considérations chimiques. Comme les notes présentées à l'Académie des Sciences par ces jeunes et habiles expérimentateurs ont fait vraiment époque dans la science du daguerréotype, nous les reproduirons textuellement.

Note du 26 *juin* 1843. — « On admet généralement que, dans une image photographique, les blancs sont produits par du mercure métallique simplement déposé sur la plaque, ou bien amalgamé, et les noirs par le bruni même de l'argent ; mais généralement aussi on s'abstient de détails sur la manière dont se passe le phénomène.

» Nous essayons ici de démontrer, par des considérations purement chimiques, que les blancs sont produits par des gouttelettes d'amalgame d'argent formées et déposées sur la surface du plaqué, et les noirs par le bruni même du métal et une poussière d'argent et de mercure.

» Cette théorie est fondée sur les trois faits suivants :

» 1° L'iodure d'argent, sous l'action de la lumière, est transformé en sous-iodure ;

» 2° Ce sous-iodure, en contact avec le proto-iodure de mercure, donne naissance à de l'iodure rouge et à du mercure métallique ;



» 3° Du mercure métallique, mis en contact avec de l'iodure d'argent, se convertit en proto-iodure, et de l'argent est mis en liberté.

» Pour le premier point, nous ne nous écartons pas de l'opinion générale, savoir : que l'iodure d'argent se convertit par la lumière en sous-iodure ; et un fait qui, entre autres, semble confirmer cette opinion, c'est que, si, après avoir exposé une plaque d'argent à la vapeur de l'iode, puis à la lumière, on la lave ensuite dans de l'hyposulfite de soude, il reste sensiblement à la surface une poudre insoluble de sous-iodure d'argent.

» Le deuxième fait se déduit de phénomènes déjà connus ; on sait, en effet, que les iodures basiques déterminent, avec le proto-iodure de mercure, la formation du bi-iodure de ce métal et un dépôt de mercure métallique.

» Le troisième fait peut se vérifier en mettant du mercure en excès au contact de l'iodure d'argent : on recueille bientôt de l'iodure vert de mercure et un amalgame d'argent.

» Ceci posé, considérons les conséquences des trois opérations principales de la photographie : l'exposition à la chambre noire, celle dans la chambre à mercure, et le lavage.

» Une plaque, ayant sa surface recouverte d'iodure d'argent, est soumise à la lumière de la chambre noire : aussitôt l'action commence, mais avec une différence essentielle dans la manière dont elle est impressionnée ; en effet, au lieu d'une lumière uniformément répandue, elle reçoit ici une distribution inégalement répartie de rayons lumineux. Dès lors l'iodure d'argent se modifie en raison directe des intensités. Là où la lumière est plus vive, il y a production abondante de sous-iodure d'argent et émission d'iode repris par la plaque ; là où doit apparaître une demi-teinte, la formation du sous-iodure est ralentie dans le même rapport que la diminution de la lumière elle-même ; enfin, dans les ombres les plus noires, l'iodure n'est que très faiblement attaqué, car l'absence de radiations ne saurait être telle qu'il ne puisse y avoir aucune altération de l'iodure d'argent.

» Que se passe-t-il maintenant quand une plaque ainsi influencée est exposée à la vapeur du mercure ?

» Ce métal commence par réagir sur tout l'iodure d'argent qu'il rencontre sur la plaque. Nous venons de voir que cet iodure a été

parfaitement conservé dans les noirs ; mais les blancs en présentent aussi une certaine quantité, quoique beaucoup moindre ; il est, en effet, dans les conditions d'une bonne épreuve qu'il n'y ait pas été entièrement décomposé. Dans les premières il se forme donc abondamment, et dans les secondes faiblement, du proto-iodure de mercure et de l'argent métallique. L'action s'arrête là pour les noirs ; mais il n'en est pas de même pour les blancs, car le proto-iodure de mercure, s'y trouvant en contact avec du sous-iodure d'argent, doit donner lieu à une double décomposition : le sous-iodure est réduit et le proto-iodure de mercure se divise : une partie passe à l'état de bi-iodure, tandis que l'autre, également réduite, devient alors la véritable source du mercure qui, s'unissant sans doute avec l'argent devenu libre, se dépose sur la plaque, mais sans s'y amalgamer. C'est donc par les parties les plus claires que l'image se révèle d'abord ; elles absorbent d'autant plus de mercure, qu'ayant été exposées à une lumière plus vive, elles sont plus riches en sous-iodure. Les ombres les plus intenses, au contraire, n'offrant que de l'iodure d'argent à la réaction du mercure, celui-ci ne peut jamais produire qu'un voile plus ou moins profond d'iodure vert mêlé à de l'argent métallique, que son état de division extrême fait paraître noir ; ce dernier restera donc en réserve pour former plus tard les noirs du tableau. Mais entre ces deux points extrêmes, entre ces ombres les plus fortes et les blancs les plus purs, il doit s'établir une demi-teinte admirablement fidèle ; puisqu'elle est le résultat nécessaire du travail plus ou moins complet de la lumière, elle s'éclaircit ou se traduit en noir, suivant la richesse ou la pauvreté de la couche en sous-iodure.

» Aussi voit-on la plaque, au sortir de cette opération, s'offrir à l'œil avec une apparence noire ou verdâtre dans les ombres, là où le proto-iodure de mercure n'a point été décomposé ; tandis qu'elle est rosée, et même souvent rouge vif, dans les blancs les plus intenses qui n'ont plus qu'un amalgame d'argent en gouttelettes imperceptibles, recouvert d'une couche de bi-iodure de mercure.

» Si l'on vient ensuite à laver cette plaque dans une dissolution d'hyposulfite de soude, l'iodure rouge de mercure se dissout ; quant à l'iodure vert, il doit encore subir ici une décomposition : il se convertit en bi-iodure qui disparaît, et en mercure métallique qui reste sur la plaque.



» Ainsi donc, en résumé, les blancs sont produits par une poussière d'une grande ténuité d'amalgame d'argent simplement déposé sur la plaque ; ces blancs sont d'un ton d'autant plus vif que cette poussière est plus abondante et plus riche en argent ; quant aux noirs, ils sont le résultat du dépôt d'un argent extrêmement divisé, mêlé mécaniquement à une très faible quantité de mercure provenant du lavage.

» Nous espérons que cet exposé, quoique fort abrégé, satisfera à beaucoup de questions qui n'ont pas encore été parfaitement résolues, et offrira une infinité de ressources pour la reproduction de belles épreuves ; car, s'il paraît constant que de la répartition convenable du sous-iodure et de l'iodure d'argent dépend la beauté du résultat, on pourra, d'après la simple inspection d'une épreuve non lavée, modifier en conséquence son mode d'opérer. Quand la plaque, au sortir de la chambre à mercure, a un aspect terne ou verdâtre, c'est une preuve qu'il y a du proto-iodure de mercure sur les clairs ; que, par conséquent, la formation du bi-iodure indispensable a échoué pour quelque motif ; en un mot, que l'épreuve est pauvre en mercure, et, par conséquent, manquée.

» Or, de toutes les causes qui mettent obstacle à la formation du dessin photographique, la plus générale et en même temps la plus funeste, est, ce nous semble, la présence d'une trop grande quantité d'iode libre sur la plaque. On conçoit, en effet, qu'exposée à l'émanation de l'iode, la surface métallique ne l'absorbe pas entièrement, mais que l'iodure formé en retient une partie emprisonnée à l'état de liberté.

» Mais comment agit cet iode libre ? Évidemment il s'oppose doublement à la formation de l'image : dans la chambre noire, en convertissant en iodure d'argent tout ce que la lumière transforme en sous-iodure (ce dernier ne pouvant exister au contact de l'iode) ; dans la chambre à mercure, en se combinant avec ce métal, et formant ainsi un voile d'iodure vert, s'opposant par là souverainement à la réaction des vapeurs mercurielles sur les couches inférieures. On peut aussi le considérer comme un obstacle éminent à la rapidité de la production de l'épreuve, puisqu'il tend à détruire constamment le travail de la lumière. Pour éviter tous ces inconvénients, il suffit d'ioder dans un endroit *convenablement* lumineux ; on voit, en effet, qu'il se forme dans ce cas un sous-iodure d'argent qui retire à la plaque

l'excès d'iode libre pour repasser à l'état d'iodure : les réactions futures n'étant plus contrariées, la réussite devient, pour ainsi dire, assurée.

» On conçoit maintenant pourquoi il est nécessaire de couvrir les bords du châssis de bandelettes de plaqué, afin de le protéger contre les vapeurs de l'iode : l'émanation qui en résulterait ensuite serait nuisible à l'épreuve ; car, d'après une déduction toute naturelle, on voit que cet iode détruirait le sous-iodure au fur et à mesure de sa formation, et s'opposerait aussi plus tard à l'action des vapeurs mercurielles, en produisant un proto-iodure inutil .

» Ainsi se trouve encore expliquée l'utilité de passer une plaque au mercure peu de temps après sa sortie de la chambre noire, l'iode qui peut encore s'y trouver à l'état libre devant nécessairement altérer l'impression produite par la lumière. »

Note du 24 juillet 1843. — « Le chlorure et le brômure d'argent étant plus impressionnables à la lumière que l'iodure de ce métal, on en a conclu, dès l'origine, que c'était à leur formation que l'on devait attribuer l'accélération des images photographiques ; néanmoins, différentes considérations nous font envisager cette question sous un tout autre point de vue ; nous allons les exposer aussi brièvement que possible.

» La quantité singulièrement faible de substances accélératrices condensées par la plaque, comparativement à l'iodure d'argent déjà formé, ne peut suffire à rendre compte de la différence énorme de rapidité qui en est le résultat.

» Le brôme ou le chlore ne peuvent être absorbés par la surface métallique abritée sous une couche relativement fort épaisse de l'iodure d'argent ; on ne voit pas non plus comment ils pourraient décomposer l'iodure, et, dans tous les cas, l'altération de l'iodure d'argent, n'étant pas en harmonie avec celle des brômures, etc., devrait nécessairement apporter un trouble grave dans l'opération. De plus, il ne serait pas possible d'expliquer les réactions de la chambre à mercure, et ceci, en venant corroborer les idées que nous avons déjà émises précédemment, démontre parfaitement pourquoi l'on n'a jamais réussi à obtenir des vues sans iodure d'argent, c'est-à-dire avec le chlore ou le brôme seuls. Considérées sous ce point de vue, ces substances sont même tellement nuisibles, que si on dépasse

d'une ou deux secondes seulement le temps fixé pour l'exposition à leurs vapeurs, il y a absence complète d'images ; car alors, ayant le temps de pénétrer jusqu'à l'argent, elles forment un brômure ou chlorure qui ne sont pas aptes à déterminer le dépôt des gouttelettes d'amalgame.

» Nous n'émettons, d'ailleurs, ces réflexions, que nous pourrions encore étayer de nombreuses observations, qu'avec la plus grande réserve, et dans le seul désir de fixer l'attention des expérimentateurs.

» Réfléchissant à l'excessive minceur de la couche sensible, appréciée par M. Dumas à un millionième de millimètre, nous l'avons considérée comme étant diaphane, et, par conséquent, pénétrable aux rayons solaires dans toute son épaisseur ; remarquant, en outre, qu'il est important que tout l'iodure d'argent ne soit pas converti en sous-iodure pour obtenir le meilleur résultat possible, nous sommes arrivés à conclure que la puissance photogénique des radiations lumineuses s'exerce dans un espace de temps pour ainsi dire insaisissable, peut-être même fort rapproché de l'instantanéité. L'image est donc dessinée sur la plaque dès les premiers moments de son exposition à la chambre noire, et si, à cet instant, rien ne se manifeste au mercure, cela ne peut tenir qu'à des causes particulières. En effet, il résulte de la théorie exposée dans une note précédente, que les diverses réactions peuvent être représentées par les formules suivantes, savoir :

» Pour la réaction de la lumière sur l'iodure d'argent ($\overline{AGI}$ étant la formule hypothétique du sous-iodure),

$$5\ \overline{AGI}^2 = 2\ \overline{AGI} + 3\ \overline{AGI}^2 + 2\ I;$$

» Pour celle de mercure sur l'iodure d'argent,

$$3\ \overline{AGI}^2 + 6\ \overline{HG} = \overline{HG}^6\ I^6 + 3\ \overline{AG};$$

» Pour celle du proto-iodure de mercure sur le sous-iodure d'argent,

$$2\ \overline{AGI} + 6\ \overline{HGI} = \overline{HG}^4\ I^8 + 2\ \overline{HG} + 2\ \overline{AG}.$$

» Or, d'après ces formules, on voit que, dans les clairs le sous-iodure devant être à l'iodure dans le rapport de 2 : 3, il n'est pas déraisonnable de soupçonner que cette proportion est très rapidement établie, et que la cause véritable du ralentissement se trouve dans l'iode mis en liberté par la lumière ; car celui-ci devient un double obs-

tacle à la rapidité par sa tendance à reformer l'iodure, soit aux dépens du sous-iodure, soit aux dépens de la plaque ; et c'est précisément là que se trouve le principe de la promptitude de l'opération ; car si l'on considère le temps nécessaire à la production d'une épreuve comme formé essentiellement de deux éléments, l'un regardant la décomposition de l'iodure, l'autre l'absorption de l'iode ; si l'on fait le premier nul, à cause de sa faible valeur, le deuxième représentera évidemment le temps exigé pour la formation de l'image (1).

» Pour activer le travail de la lumière, il s'agit donc de rendre le plus court possible le temps nécessaire à l'absorption de l'iode ; or, tel est le rôle que nous semblent jouer les substances accélératrices, dont la puissance est due à trois causes : leur mélange intime avec l'iodure, leur affinité pour l'iode, enfin l'état naissant dans lequel se présente ce dernier.

» Mais comment le brôme adhère-t-il à la plaque, et à quel état s'y trouve-t-il ? Nous avons vu qu'on peut regarder une plaque iodurée comme retenant toujours de l'iode libre ; dès lors on comprend facilement ce qui doit se passer ; ce même iode libre, en effet, est très propre à retenir le chlore ou le brôme : il se sature donc de leurs vapeurs, qui peuvent ainsi demeurer sur la plaque, se mêler intimement à l'iodure, et devenir d'autant plus efficaces qu'elles constitueront un composé plus riche en brôme ou en chlore.

» Or, une conséquence à tirer de cet exposé, c'est que moins il y a d'iode libre sur une plaque, moins il y a de brôme absorbé ; l'expérience vient confirmer cette conjecture. Telle plaque qui, dans l'état normal, peut être exposée aux vapeurs du brôme pendant dix-huit secondes, s'en trouve saturée même après trois secondes, quand on la prive, autant qu'il est possible, de son iode libre.

» Une autre conséquence à déduire de ce qui précède, conséquence très importante, puisqu'elle a son côté pratique, c'est qu'il n'est pas nécessaire qu'une substance puisse former avec l'argent un composé impressionnable pour contribuer à l'accélération de l'effet photogra-

(1) S'il était constant que l'image fût formée presque instantanément dans la chambre noire, l'action des verres continuateurs ne serait-elle pas plutôt, dans le cas qui nous occupe, une action protectrice, en déterminant l'élimination de l'iode, soit par l'évaporation, soit par un tout autre mode d'action analogue à cette explication ?

phique; bien au contraire, il est utile, il est mieux que cette substance n'ait aucune affinité pour ce métal. On voit donc que le champ des recherches s'élargit considérablement, et que l'on n'est plus tenu à rester dans le cercle étroit du brôme et du chlore, pour aviser au moyen de rendre l'opération plus rapide.

» Néanmoins le brôme remplit très bien ce but; mais on conçoit de suite que la combinaison formée n'est pas tellement stable, que les deux corps qui la composent ne puissent encore tendre à s'unir à l'argent, ce qui doit nécessairement apporter un certain retard à la manifestation de l'image : nous avons donc pensé que la vitesse s'accroîtrait si l'on pouvait donner à ce composé une plus grande fixité, et fournir à la plaque, d'une manière indirecte, une plus forte dose de brôme ou de chlore.

» Les moyens dont nous nous servons consistent à faire arriver sur la plaque certaines substances que nous allons désigner; seules, elles n'agissent pour la plupart que faiblement, elles n'atteignent le maximum de puissance que lorsqu'elles sont mélangées au brôme ou au chlore, et ceci se conçoit, car nous avons vu qu'il faut un corps déjà préexistant sur la plaque pour retenir les substances accélératrices : or, les composés que nous employons n'ayant pas assez d'affinité pour l'iode, ne peuvent s'y unir directement : il faut donc se servir du brôme ou du chlore comme de véhicules : ils se trouvent, dès lors, entraînés avec eux, et restent sur la plaque, où ils agiront plus tard, comme nous l'avons dit, et sans doute encore par voie de double décomposition.

» Les substances qui nous ont paru offrir le plus d'accroissement de rapidité, sont : l'hydrogène, le phosphore, et particulièrement le carbone.

» L'action de l'hydrogène peut se vérifier au moyen d'un simple mélange de brôme et d'acide brômhydrique; celle du carbone, en ajoutant par portions à 10 grammes de brôme, environ 39 grammes de brômure d'hydrogène bi-carboné ou d'éther brômhydrique : il est évident que ces deux corps peuvent être remplacés par une nombreuse série de substances organiques; tous les carbures d'hydrogène remplissent le même but. Les résines, la plupart des huiles essentielles, l'eupion et presque tous les produits de la distillation des matières végétales, l'huile de naphte, etc., peuvent être ajoutés

au brôme avec le plus grand avantage ; mais on voit que, dans ce cas, il y a formation d'acide brômhydrique qui n'est pas nuisible, à la vérité, mais dont les vapeurs blanches très abondantes peuvent être désagréables. On peut éviter cet inconvénient en se servant de brômure de carbone pur ajouté au brôme, ou simplement en projetant dans 5 grammes de brôme, 2 grammes d'iodoforme : il se forme du brômure de carbone et du perbrômure d'iode en proportions convenables. Un autre moyen consiste dans l'emploi du brôme dissous dans du brômal : sans chercher à se procurer du brômal pur, on atteint le même résultat en versant dans 5 grammes de brôme, quelques gouttes d'alcool anhydre ; il y a formation de brômal et d'huile brômalcoolique, avec un excès de brôme nécessaire. L'alcool peut encore ici être remplacé par nombre de substances qu'il est inutile d'énumérer ; nous citerons seulement les huiles grasses et siccatives, la plupart des graisses, l'esprit de bois, et sans doute les nombreuses combinaisons du méthylène, l'esprit pyroacétique et pyroligneux, etc. Enfin le cyanogène donne quelque accroissement de vitesse.

» Des résultats satisfaisants sont aussi obtenus par le mélange de plusieurs de ces substances, et la présence de l'oxygène, dans la composition de quelques-unes d'entre elles, paraît favoriser la réaction plutôt que la ralentir. Plusieurs personnes semblent avoir remarqué parfois des variations irrégulières dans l'emploi du brôme : ne pourrait-on pas expliquer ceci par la production accidentelle d'acide brômhydrique ou de brômal ?

» On arrive, par ces moyens, à prendre une vue en moins de deux secondes (1) ; toutefois, il faut remarquer que cette rapidité est calculée d'après un appareil pour grande plaque et à long foyer, de M. Charles Chevalier : il va sans dire qu'elle serait tout autre si l'on faisait usage d'appareils à court foyer ou d'ouverture de diaphragme exagérée.

» Quant au mode d'emploi de ces composés, il paraît probable qu'ils peuvent être mis en usage par les moyens ordinaires, c'est-à-

(1) Nous ne doutons pas le moins du monde de l'assertion de MM. Choiselat et Ratel ; mais jusqu'à présent, à notre connaissance, ils sont les seuls qui soient arrivés avec leur substance à une pareille rapidité. *Le Rebours.*

dire en les prenant à l'état de dissolution dans l'eau ou l'alcool; nous ne l'avons pas essayé, mais nous donnons ici la manière suivant laquelle nous avons toujours employé le brôme, et que nous avons préférée à cause des avantages qu'elle offre sous le rapport de la célérité et de l'extrême simplicité. Elle consiste à prendre les substances accélératrices à l'état gazeux; pour cela, il suffit d'avoir à sa disposition une petite pompe graduée de la capacité de 0^m,01, terminée par un tube capillaire, et un flacon de 0^m,02 dans lequel on a introduit, une fois pour toutes, 20 à 25 grammes de la substance dont on a fait choix. Quand on veut prendre une vue, il suffit d'introduire dans le flacon le tube capillaire de la pipette, et de pomper environ un demi-centilitre de la vapeur répandue dans le flacon, puis d'injecter cette vapeur dans la boîte à brôme, au moyen d'une petite ouverture qu'on ferme ensuite. La boîte que M. Foucault a imaginée, pour l'emploi de l'eau brômée, convient parfaitement pour cet usage. Le temps d'iodef la plaque est ensuite suffisant pour opérer complétement le mélange du gaz avec l'atmosphère de la boîte, et l'on compte ensuite à la manière ordinaire. Cette disposition évite ainsi un attirail embarrassant, et la liqueur contenue dans le flacon peut servir indéfiniment. »

Note du 6 *novembre* 1843. — « L'iodure d'argent étant la couche impressionnable sur laquelle toutes les réactions doivent successivement se produire, c'est à sa formation régulière que l'on doit surtout s'appliquer; de là dépend toute la suite de l'opération; les qualités de cette couche peuvent se résumer dans trois conditions essentielles: richesse, sensibilité, limpidité.

» Certaines difficultés s'opposent à la réunion de ces trois conditions, et c'est ordinairement à leur absence qu'il faut attribuer les résultats incertains et défectueux d'un grand nombre d'expériences, résultats dont on accuse souvent à tort, soit la substance accélératrice, soit toute autre cause illusoire. Aussi a-t-on vu se répandre, par suite de ces incertitudes, l'usage de ces nombreux moyens indirects, de ces liqueurs dites *allemandes*, qui, par leur composition, ont pu donner peut-être un résultat plus assuré, mais au détriment de la sensibilité et de la vigueur du dessin.

» Déjà nous avons dit comment la richesse est obtenue en iodant fortement, et la sensibilité par l'addition du brômeforme, etc.;

nous pensons aussi qu'on ne doit pas moins s'attacher à sa limpidité. Son défaut de transparence produit ce fâcheux effet, que la lumière, ne pouvant pénétrer simultanément dans toute son épaisseur, n'agit plus que partiellement ou successivement : de là un trouble grave dans le travail de la chambre noire, et ces trois conséquences malheureuses pour l'épreuve :

» Le sous-iodure d'argent n'est plus mélangé intimement avec l'iodure selon qu'il est nécessaire, ces deux corps se trouvant, pour ainsi dire, superposés en deux couches ; par suite, point de vigueur dans les clairs et les noirs de l'image.

» Les réactions mercurielles n'ayant lieu que dans les couches supérieures, le dépôt de mercure ne se trouve plus dans une juxtaposition parfaite avec la surface du plaqué : de là point de régularité dans la création du tableau, peu d'adhérence entre le mercure et la plaque, et absence de coloris dans le dessin.

» Enfin, la lumière, n'agissant plus que progressivement, a toujours achevé le travail des clairs avant d'avoir complété celui des ombres : ainsi point d'harmonie entre les blancs et les noirs, point de détails dans les ombres.

» L'oubli de ces trois conditions importantes détermine, dans les épreuves, ces ombres si tranchées là où la nature ne nous offre que des demi-teintes ; c'est également par suite de cet oubli que l'on regarde à tort comme à peu près impossible de faire venir simultanément un objet d'un blanc pur et un autre très noir ; dans ce cas, l'un des deux objets ne viendra, dit-on, qu'au détriment de l'autre ; et cependant, si la limpidité de la couche sensible eût permis à chaque radiation de pénétrer également dans l'iodure d'argent, chaque objet eût apparu rigoureusement selon l'intensité de ces mêmes radiations, car on doit exiger du daguerréotype l'image exacte qui est peinte dans la chambre noire, tous les points de cette image agissant à la fois sur l'iodure, mais avec une énergie différente.

» Nous avons déjà signalé la funeste influence qu'exerce sur les épreuves une trop grande accumulation d'iode libre ; or, c'est encore son excès que nous devons ici redouter ; car, outre qu'il enlève à la plaque cette limpidité indispensable, il étouffe aussi l'action des substances accélératrices, et s'oppose à l'absorption du brômoforme.

» En effet, nous avons cherché à démontrer que le brômoforme,

brômal, etc., ne peuvent demeurer sur la plaque qu'avec l'auxiliaire du brôme ; ce dernier corps, formant avec l'iode libre un per-brômure d'iode, retient avec lui le brômoforme, et tous deux peuvent agir ensuite à la chambre noire. Or, qu'arrive-t-il quand la couche d'iodure a été mal préparée? L'iode libre étant en plus grande quantité qu'il ne doit être, au lieu d'un per-brômure, on n'a plus qu'un proto-brômure ; si donc la plaque est mise en cet état à la chambre noire, sa sensibilité sera moindre que dans le premier cas ; car nous savons que l'absorption, par le brôme, de l'iode libéré, est en raison inverse de la quantité d'iode qu'il tient déjà en combinaison ; mais si, au lieu d'une simple émanation de brôme, on a recours à l'atmosphère mixte de brôme et de brômoforme, la plaque n'absorbe plus alors que le brôme et laisse le brômoforme, ce dernier ne pouvant rester dissous dans le brôme que si sa tendance à s'unir à lui n'est pas détruite, ou du moins considérablement diminuée par la combinaison de celui-ci avec un grand excès d'iode : telle est, sans doute, la cause de l'inégalité d'action qu'offrent les substances accélératrices entre les mains des divers opérateurs, cette singulière anomalie étant la conséquence du plus ou du moins de limpidité obtenue par suite de quelque négligence, ou d'une appréciation vicieuse dans la préparation de la couche sensible.

» Or, les raisons qui s'opposent à une préparation convenable étant très multipliées, et exigeant ainsi des soins très étendus, nous avons cherché à rendre ce travail plus facile, et nous croyons que le triple but que nous nous proposons : la célérité, la certitude de l'opération et la beauté singulière de l'image, sera atteint par l'usage d'un iode contenant, outre le brôme, les substances accélératrices que nous avons publiées. On peut arriver à ceci directement ou indirectement, en versant de l'alcool absolu sur l'iode ; si, après que celui-ci a repris quelque consistance, on promène au-dessus un flacon débouché et incliné contenant du brôme, on voit qu'il y a formation de brômal, d'acide brômhydrique, et aussi d'un peu d'huile brômalcoolique, qui agissent comme il convient, c'est-à-dire en se mêlant plus intimement et plus abondamment à l'iodure, en contribuant par eux-mêmes à l'absorption du brôme, et peut-être aussi en remplaçant l'iode libre en partie.

» Si l'on se sert ensuite de brômoforme, on remarquera l'extrême

sensibilité que nous avons annoncée ; le mélange auquel nous donnons la préférence est composé de 8 à 10 grammes de brôme contre 20 grammes de brômoforme.

» Une plaque ainsi préparée doit présenter les caractères suivants : après l'iodaration, être rouge vue par réflexion sur une feuille de papier blanc, et vert-olive translucide vue de face, sans aucun signe d'opacité ou de couleur différente ; après l'exposition aux vapeurs mercurielles, être rouge vif dans les clairs, ou, ce qui vaut mieux encore, d'une couleur bleuâtre tirant sur un violet très-clair. Nous ajouterons qu'il est préférable d'avoir une boîte disposée de telle sorte que la planchette portant la plaque soit isolée de ses parois, afin que la vapeur puisse circuler sans aucun obstacle, comme aussi d'ioder directement, tamisant seulement la vapeur à travers une étoffe de verre, s'il était possible : les dispositions primitives de M. Daguerre sont ainsi à peu près conservées.

» Si parfois certaines boîtes d'iode ont paru meilleures que d'autres, et si des traces d'humidité s'y sont manifestées, on peut sans doute l'attribuer à la présence de l'acide hydriodique provenant de la décomposition de matières organiques, et condensant l'humidité de l'atmosphère ; il faut obvier à cet inconvénient en exposant la boîte au grand air ou en ajoutant de l'iode. »

La théorie que nous avons développée d'abord est plutôt mécanique que chimique; celle de MM. Choiselat et Ratel est exclusivement chimique. Laquelle de ces deux théories est la plus vraie? Nous ne prononcerons pas : la question est encore trop obscure ; nous croyons seulement devoir insérer encore la note suivante de M. Fyfe, parce qu'elle présente, sous un jour plus lumineux, quelques-unes des difficultés que les phénomènes du daguerréotype soulèvent.

« La difficulté de se rendre un compte satisfaisant des moyens employés pour la production des dessins donnés par l'appareil de M. Daguerre, doit engager à recueillir tout ce qui peut tendre à avancer la théorie de ces procédés compliqués.

» M. Arago avait d'abord conjecturé que l'effet final produit par le lavage, au moyen de l'hyposulfite de soude, pouvait être dû à ce que ce sel enlevait l'iode, et à ce que son soufre, agissant sur l'argent, se combinait avec le métal et formait un sulfure noir dont le contraste

avec la surface blanche mercurielle formait les teintes claires et foncées du tableau. Mais cette hypothèse ne peut être admise, puisque M. Arago lui-même a reconnu qu'un lavage au sel marin, qui ne renferme point de soufre, présente néanmoins le même résultat. Dans l'opinion de M. Fyfe, le dessin est produit, non par des combinaisons chimiques différentes, mais par des réflexions variées de la lumière sur les surfaces métalliques. Voici comment il explique les différentes opérations nécessaires au succès du daguerréotype.

» Le poli à donner à la surface argentée est purement mécanique, et il est évident que plus le métal offrira de brillant, plus il sera facile d'obtenir une image bien distincte. Il est plus difficile d'expliquer l'action de l'acide nitrique étendu. Il n'est pas probable qu'il se forme du nitrate d'argent, comme quelques-uns l'ont affirmé, car l'acide est trop étendu et la quantité nécessaire trop petite pour que l'on puisse admettre ce mode d'action. Peut-être ne sert-il qu'à enlever le cuivre qui adhère à la surface de l'argent. L'auteur a maintenu, pendant quelque temps, de l'acide nitrique étendu sur une lame polie, au moyen d'une ceinture en cire et en frottant légèrement le métal avec du coton ; il n'a pu découvrir dans le liquide aucune trace d'argent, même lorsqu'on élevait la température ; mais ce même liquide donnait des indices distincts de la présence du cuivre, qui semble rendre probable la conclusion de l'auteur, que l'acide nitrique ne sert qu'à rendre plus pure la surface argentée de la lame.

» On a diversement expliqué l'action de l'iode : les uns ont pensé que la couche mince, couleur d'or, qui se forme à la surface de la lame, n'est qu'une lame d'iode pur, tandis que d'autres y voient la formation d'un véritable iodure d'argent. Il semble que, si ce n'était que de l'iode, le frottement ou l'application de la chaleur l'enlèverait aisément. Or, il n'en est point ainsi : chauffée à l'abri de la lumière, la lame conserve sa couleur dorée. La potasse ne l'enlève point, ce qu'elle ferait si c'était de l'iode. Il faut donc admettre la formation d'un véritable iodure dont la couleur varie selon la durée de l'exposition à la vapeur d'iode, et qui offre souvent, si cette opération est prolongée, de belles couleurs prismatiques, tantôt dispersées en bandes latérales, tantôt en anneaux concentriques.

» Lorsque la lame iodurée ne reste que le temps requis dans la

chambre obscure, elle n'offre aucune altération apparente, et l'action de la vapeur mercurielle est nécessaire à la production de l'image. Il est évident cependant que la lumière a eu sur l'iodure d'argent une influence particulière : il faut que l'iodure ait été altéré dans sa constitution, ou bien décomposé sous son influence. Si la lame reste longtemps dans la chambre obscure, ou bien qu'on l'expose directement à la lumière, surtout aux rayons du soleil à travers une gravure, comme on le fait avec du papier photographique, on obtient immédiatement une image dans laquelle les parties exposées à la lumière sont foncées, tandis que les autres conservent leur couleur dorée. On remarque que les portions éclairées deviennent d'un violet foncé, et la friction en détache une partie noirâtre. Mise dans l'eau ou l'alcool, cette poudre ne laisse dissoudre aucune trace d'iode libre. La chaleur ne sépare non plus aucune vapeur d'iode d'une lame iodurée qui a été ainsi noircie par son exposition à la lumière, et sa surface n'en est point altérée. Tout ceci rend évident que ce n'est point de l'iode qui constitue la poudre noire formée sur la lame iodurée par l'action de la lumière. Il est bien probable que c'est l'iodure d'argent séparé de la lame métallique ; mais l'auteur n'en a pu recueillir assez pour l'analyser complétement.

» Lorsqu'on sort la lame iodurée de la chambre obscure, et quoiqu'on n'y puisse encore apercevoir aucune image, si on l'expose à la vapeur mercurielle, il est évident que le mercure ne s'attache qu'aux parties qui ont été soumises à l'action de la lumière. Plus cette action a été forte, plus l'iodure a été attaqué, plus est épaisse la couche mercurielle qui s'attache à l'argent. Cela donne des apparences diverses de surfaces mercurielles, tandis que les portions non attaquées restent avec leur teinte dorée.

» Lorsqu'on lave la lame à l'hyposulfite de soude, tout l'iodure d'argent est enlevé, et les surfaces métalliques, argent et mercure, restent seules à nu. C'est, selon l'auteur, le contraste entre ces surfaces, et non point l'action chimique exercée par l'hyposulfite, qui produit l'effet du dessin. Ce n'est que la différence de réflexion de la lumière par une lame brillante d'argent et une couche terne de mercure : la première formant les teintes sombres, et celles-ci les teintes claires du tableau, tandis que les variétés d'ombres et de clairs sont produites par la diverse épaisseur des couches mercurielles.

» Que telle soit la cause réelle des brillants effets ainsi obtenus, c'est ce qu'une expérience bien simple semble démontrer. Si l'on place un objet, par exemple un morceau de papier découpé, humecté ou gommé, pour le rendre adhérent, sur une lame polie et brillante de daguerréotype, et qu'on l'expose à la vapeur mercurielle, selon la méthode indiquée par Daguerre, les portions non recouvertes sont seules susceptibles de recevoir l'amalgame mercuriel. Si l'on enlève alors le papier, l'on aura une image toute semblable à celle d'un dessin au daguerréotype, visible seulement de biais, la surface de l'argent recouverte par le papier étant obscure, et les parties amalgamées claires. On peut obtenir un semblable résultat sur l'étain, le fer-blanc et le cuivre, pourvu qu'ils soient bien polis, et même sur le verre; mais il faut alors volatiliser le mercure à une température plus élevée et tenir la lame dans une position particulière, pour pouvoir discerner l'image de l'objet.

» Ces images ainsi obtenues se détruisent aisément. Mais si, au lieu d'opérer à la basse température conseillée par M. Daguerre, on élève le mercure à 120° R., la lame amalgamée présente non-seulement une surface beaucoup plus claire, mais encore le mercure y adhère si fortement, qu'il faut le secours du tripoli pour l'enlever. Cela donne un moyen facile de multiplier à volonté des silhouettes sur l'argent. On met, pour cela, sur la lame polie, la silhouette légèrement gommée, et on la presse pour qu'elle adhère sur tous les points; après quoi, on la place dans la boîte à mercure, et l'on chauffe à 120° R. environ. On enlève la lampe, et on laisse l'appareil se refroidir avant de le démonter. La seule précaution à prendre, c'est que le papier ne se sépare pas de la lame métallique, ce qui arrive nécessairement à une température si élevée, quand on s'est contenté de l'humecter sans le rendre adhérent avec un peu de mucilage. On peut aisément enlever la légère couche gommeuse qui recouvre l'image, en plongeant la lame dans l'eau chaude, ou en la frottant légèrement avec une éponge. Si la silhouette n'est pas parfaitement distincte, on peut recommencer l'opération avec la même lame, en enlevant la couche mercurielle avec de la poudre à polir. »

D'un autre côté, M. Gaudin semble avoir tranché, par une expérience décisive, la question de la formation du sous-iodure d'argent. Il s'était dit : « Si la lumière enlève de l'iode à l'iodure d'ar-

gent, une nouvelle exposition à la vapeur d'iode devra effacer et au delà l'impression de la lumière. » Il a donc exposé, pendant plusieurs minutes, aux rayons directs du soleil, une plaque iodurée, jusqu'à ce qu'elle eût acquis, sur une de ses moitiés, une teinte très-foncée ; l'autre moitié avait été masquée avec soin : il soumit ensuite la plaque ainsi modifiée à l'action du chlorure d'iode, la plaça dans la chambre obscure, et la soumit enfin au mercure, comme à l'ordinaire. Il obtint ainsi une épreuve sur laquelle l'œil le plus exercé ne pouvait distinguer aucune différence entre la moitié préalablement noircie aux rayons solaires, et l'autre moitié qui avait été dérobée à cette action : on pouvait seulement voir entre elles une ligne de démarcation infiniment légère.

En second lieu, il noircit à la lumière solaire directe, comme précédemment, une plaque iodurée jaune clair ; puis il la soumit aux vapeurs d'iode jusqu'à formation de la couche rouge. Cette plaque, exposée à la chambre obscure et à la vapeur mercurielle, comme d'ordinaire, donna, après une minute, une épreuve qui, sans cette opération, eût exigé 3 ou 4 minutes ; ainsi, loin d'affaiblir la sensibilité de l'iodure d'argent, l'exposition préalable à la lumière accroît cette sensibilité, pourvu, toutefois, qu'à la fin de l'opération on ferme avec le plus grand soin tout accès à la lumière. M. Gaudin a de même présenté au soleil, pendant une seconde, une plaque préparée au chlorure d'iode ; et après l'avoir exposée de nouveau aux vapeurs du chlorure, il a obtenu une diminution de sensibilité, uniquement, sans doute, parce qu'on n'avait pas pu détruire, par une nouvelle exposition au chlorure, l'effet de la lumière solaire, sans augmenter beaucoup l'épaisseur de la couche et diminuer par là sa sensibilité.

Il est donc évident qu'on pourra désormais ioder les plaques en plein jour, à la rigueur même au soleil, pourvu que l'opération s'achève dans l'obscurité. En procédant ainsi en plein jour, M. Gaudin a obtenu en *deux secondes* une très-belle épreuve sur nature vivante. L'observation attentive de la première couche d'iodure par réflexion sur un papier blanc largement éclairé par la lumière du jour, est de la plus haute importance, en ce qu'elle permet de découvrir sur la plaque les moindres défauts de préparation, et de bien juger le changement de couleur amené plus tard par le chlorure d'iode.

Nous appellerons encore l'attention sur une note extrêmement

curieuse, communiquée tout récemment par M. Claudet à l'Association pour l'avancement des sciences, réunie à Oxford.

M. Claudet a trouvé que quand le soleil paraissait rouge à travers les vapeurs de l'atmosphère, non-seulement il ne produisait aucune action sur la plaque daguerrienne, mais que de plus il détruisait l'action produite d'abord par la lumière blanche. Si l'on prend dans la chambre obscure, avec le daguerréotype, l'image du soleil rouge, il donne une représentation noire. Quand on recouvre une plaque daguerrienne obtenue par la lumière avec un verre rouge, orangé ou jaune, les radiations transmises par ces milieux colorés ont aussi pour effet de détruire l'action produite par les rayons blancs, et même de rendre à la plaque sa sensibilité première : de telle sorte, qu'après avoir été affectée par la lumière blanche et restaurée par l'action destructive des rayons rouge, orangé ou jaune, elle est aussi apte à rendre une image photogénique que si elle venait d'être tout récemment iodurée ou brômurée. On peut multiplier indéfiniment ces alternatives de destruction et de restauration, sans que la plaque cesse de revenir à son état premier. Ce fait curieux tendrait peut-être à prouver que, dans les procédés daguerriens, la lumière n'altère pas intimement, au moins d'une manière stable, la composition chimique de la couche primitive, et que son affinité pour le mercure est le résultat de propriétés mécaniques nouvelles communiquées par l'action de la lumière. Les expériences de M. Claudet prouveraient encore que les rayons rouge, orangé et jaune, sont doués d'une action photogénique propre, laquelle, comme celle des rayons bleu et violet crée l'affinité pour le mercure ; mais l'action photogénique du rayon rouge serait détruite par celle du rayon jaune, et réciproquement : de même, les rayons rouges et jaunes neutraliseraient l'action photogénique des rayons bleus, comme les rayons bleus détruiraient les actions de tous les autres rayons. L'action photogénique ou neutralisante d'un rayon particulier ne pourrait pas être continuée par une autre. En résumé, chaque radiation changerait l'état de la plaque, et chaque changement la rendrait sensible à l'action des vapeurs de mercure si elle n'existait pas, la détruirait si elles existait.

Les pages qui précèdent suffisent, il nous semble, à donner une idée complète des mystérieux procédés du plus étonnant des arts. Dans le monde des infiniment petits, comme dans le monde des infi-

niment grands, ou de ces globes immenses qui éclairent l'espace, nous avons retrouvé ces merveilles écrasantes qui confondent l'esprit humain. Ce sont, d'une part, les rayons lumineux dont les ondulations s'expriment à peine par des millionièmes de millimètres, et qui, réalisant cette dénomination prophétique de pinceau qu'ils avaient reçu depuis longtemps, dessinent eux-mêmes les objets qui les ont fait naître, ou qu'ils ont frappé; de l'autre, c'est une couche d'une épaisseur infiniment petite, et qui, néanmoins, se modèle de manière à reproduire tous les effets de relief et de lumière les plus dissemblables : ce sont, enfin, des métaux en apparence si grossiers, qui, se précipitant en atômes insaisissables, se moulent sur ces élévations et ces profondeurs plus que microscopiques, et rendent, avec une perfection incompréhensible, tous les effets de clair obscur et de teintes produits par le plus silencieux et le plus inoffensif des agents naturels.

Quand, il y a plus de trente ans, l'immortel Niepce, dont le nom devrait dominer celui même de Daguerre, disait à l'un de nos amis, en lui faisant remarquer son image réfléchie sur une glace : « Cette image, je la fixerai un jour ! » cet ami souriait presque de pitié : l'immense problême a cependant été résolu, et chacun des objets les plus inertes du monde matériel ou organique, devenu, comme par enchantement, un artiste accompli, se peint lui-même avec une désespérante vérité. Nous avons vu mille fois, nous voyons tous les jours, ces prodiges s'opérer sous nos yeux, et tous les jours notre imagination se perd dans l'abîme de l'infini, et notre âme, transportée d'admiration, se tait et adore.

N'exagérons pas cependant, et, pour rester dans le vrai, terminons cette longue digression en empruntant à l'un des rédacteurs de la Bibliothèque universelle de Genève quelques notions sur la photographie au point de vue de l'art.

Lorsqu'on annonça l'admirable découverte de M. Daguerre, bien des personnes s'imaginèrent que la peinture allait être détrônée, que c'en était fait de la science du dessin, et de cet être idéal qu'on appelle l'art. Qu'est-ce que c'est que l'art, en effet, disait-on, si non une imitation parfaite de la nature ? Or, voici un procédé mécanique au moyen duquel la nature, morte ou vivante, viendra désormais se représenter ou se fixer elle-même sur une plaque de métal, avec autant de

fidélité qu'un visage réfléchi dans une glace bien polie et parfaitement étamée. En parlant ainsi, on oubliait que, suivant l'expression de M. de Lamennais, l'art n'est pas l'imitation de la nature ; que la peinture ne se borne pas à représenter les objets tels qu'ils apparaissent à nos yeux ; qu'elle n'en est pas seulement l'exacte image. Si c'était là, en effet, sa fonction propre, le daguerréotype serait fort au-dessus de Raphaël et du Poussin ; mais il n'en est rien. Il se mêle toujours quelque chose de nous aux lieux que nous voyons : l'impression physique que nos sens en reçoivent se transforme au dedans de nous-mêmes, et nous pénètre, pour ainsi parler, d'une image idéale en harmonie avec nos pensées, nos sentiments, notre être intime. Il y a dans les œuvres des maîtres une mystérieuse magie qui nous retient des heures et des siècles plongés dans une vague contemplation devant ce que la nature a de plus ordinaire et de plus simple en apparence ; une prairie avec un ruisseau et quelques vieux saules... Ne voit-on pas qu'ici c'est la pensée de l'artiste, la vie externe qui se communique à vous, s'empare de vous, etc.

Quand même donc la photographie parviendrait à fixer les couleurs, comme elle est parvenue à fixer les lumières et les ombres, elle n'arrivera jamais à faire un tableau. Il manque à ces imitations si parfaites, ce je ne sais quoi qui, dans les imitations bien moins fidèles d'un dessinateur ou d'un peintre, réveille mille souvenirs et mille sentiments, charme non plus l'œil armé d'une loupe, mais l'âme agitée par mille impressions, etc., etc. Or, ce je ne sais quoi qui manque et manquera toujours aux épreuves daguerriennes, qui les placera toujours à une grande distance des simples produits d'une création intelligente, c'est la conscience de la pensée et de la volonté humaine, c'est le *mens agitans molem*, c'est l'art, que l'on n'arrivera jamais à matérialiser, et qui ne sera jamais le produit d'une action mécanique, etc., etc. Voyons donc et admirons dans la photographie une brillante et glorieuse conquête de la science, un procédé merveilleusement parfait auprès duquel tous les procédés humains sont lourds et grossiers ; goûtons le plaisir d'une ressemblance absolue et d'une curiosité satisfaite ; mais plaçons bien haut au-dessus de cette reproduction mécanique où tout est beau, parfait, mathématiquement exact, mais où rien ne vit, rien ne parle, rien n'exprime, l'œuvre que le génie a fait pleine de lui-même, d'où sortent à son

appel les souvenirs, les traits oubliés, les images effacées, qui mettent en vibration toutes les cordes de notre âme, et nous émeuvent profondément. Ce qu'il faut à notre nature, ce n'est pas une simple identité matérielle perçue par les organes, mais une ressemblance intelligente qui nous saisisse tout à coup, et éveille en nous mille sentiments divers.

Nous revenons maintenant aux recherches qui ont eu pour objet la nature intime du spectre solaire et des propriétés des rayons chimiques. Pour procéder avec quelque ordre à travers cette multitude de mémoires qui se croisent en tout sens, nous donnerons d'abord une analyse succincte des travaux de chaque physicien, puis nous réunirons, sous un même coup d'œil, la série des propositions dans lesquelles toutes ces recherches se résument.

TRAVAUX DE M. HERSCHEL. — PREMIÈRE NOTE. — 1839. — En regardant le spectre solaire à travers un verre bleu foncé coloré par le cobalt, on aperçoit des rayons rouges extrêmes qui échappent à la vue directe, à cause de l'éclat des autres couleurs. Cette portion du spectre, qui paraît avoir été observée d'abord par M. Cooper en mai 1839, est sillonnée par deux raies obscures, quelquefois par un plus grand nombre ; non-seulement elle ne noircit pas le papier sensible, mais de plus, si elle agit simultanément avec la lumière diffuse, elle empêchera l'action de cette dernière, et le papier restera blanc.

Quand une feuille de papier sensible est exposée à l'action d'un spectre solaire fortement concentré, elle reçoit rapidement l'impression de ce spectre, et non pas seulement une impression noire, mais une impression colorée : le rouge est assez vif, quoique sa nuance se rapproche plus de celle des briques que du rouge pur donné par le prisme. Ce qu'il y a de remarquable, c'est que la partie de cette empreinte qui correspond à l'extrémité même du spectre manque totalement. Le vert est sombre et d'une couleur métallique, le bleu se fonce et tend vers le noir, le jaune manque absolument. La longueur totale du spectre chimique est presque double de celle du spectre lumineux, son extrémité la plus réfractée paraît légèrement rougeâtre ou violette.

Il est impossible de former un spectre brillant et concentré, sans qu'il soit en quelque sorte noyé dans la lumière diffuse, qui elle-même colore le papier ; l'empreinte du spectre est par là même

formée sur un fond noirâtre, qui se montre en effet partout, excepté sur la portion que couvraient les rayons rouges extrêmes, et qui, réellement préservée, apparaît de plus en plus blanche, à mesure que l'action de la lumière diffuse noircit de plus en plus le reste du fond. L'action de ces mêmes rayons rouges sur l'empreinte produite par les autres couleurs, est encore plus remarquable. Quand on les reçoit sur du papier qui a été légèrement noirci par l'effet des rayons bleus et violets seulement, ils le colorent en rouge, et cette action paraît être un premier pas vers la décoloration, qui serait complète après un certain temps. De même, la lumière qui a traversé un de ces verres rouges qui ne laissent passer que les rayons rouges les moins réfrangibles, colore en rouge brillant le papier noirci par l'action des rayons verts. Un échantillon de papier devenu complétement noir par l'effet de son exposition à la lumière du jour, revêt une riche teinte pourpre sous l'influence de ces mêmes rayons rouges dont l'effet semble être une destruction lente et graduelle des impressions causées par les autres rayons.

SECONDE NOTE. — *Mars* 1839. — M. Herschel l'a lui-même résumée dans ces quelques mots. 1° L'emploi des dissolutions d'hyposulfite pour fixer les images photographiques repose sur la propriété fondamentale qu'elles possèdent, et que M. Herschel a le premier reconnue dès 1821, de dissoudre le chlorure, l'iodure et les autres sels d'argent, insolubles dans la plupart des autres dissolutions. Il a été reconnu plus tard que M. Daguerre employait lui-même les hyposulfites.

2° Après avoir constaté la faible sensibilité du chlorure d'argent, M. Herschel chercha à l'accroître par divers moyens; mais M. Talbot l'avait devancé dans cette voie nouvelle, et arriva plus efficacement au but.

3° M. Herschel, enfin, indiqua les moyens par lesquels il avait réussi à copier les dessins et les gravures, et à fixer les images formées au foyer de la chambre obscure. Ces moyens ont été remplacés par ceux de M. Talbot.

TROISIÈME MÉMOIRE. — 20 *février* 1840. — Les points principaux sur lesquels M. Herschel appelait l'attention étaient les suivants :

1° *Moyens de fixer les dessins photographiques.* Il discute tous ceux qui ont été employés, tels que l'hyposulfite de soude, l'hydriodate de potasse, le ferrocyanate de potasse, etc. Il avait remarqué,

avant MM. Talbot et Lassaigne, que l'avant-dernier de ces sels donne au papier noirci par la lumière la faculté de blanchir sous une nouvelle influence de ce même agent. Si l'action de l'hydriodate avait été parfaitement constante, on serait entré immédiatement en possession d'un papier donnant des images positives par une seule exposition à la lumière.

2° *Production des images photographiques sur papier et leur transport.* — 3° *Préparation du papier photographique.* — Il détaille les diverses combinaisons qu'il a essayées dans le but d'accroître la sensibilité de ces papiers. Il signale la valeur de quelques mordants, tels que les sels de plomb. Il indique le moyen de précipiter sur une lame de verre une couche légère de chlorure d'argent parfaitement pur, et d'obtenir ainsi sur verre des images photographiques que l'on fait disparaître ou reparaître plusieurs fois en les couvrant d'hyposulfite de soude. Cette méthode de revêtir le verre d'une couche de la substance impressionnable qu'on veut étudier semble préférable à toutes les autres. Après avoir donné les résultats de ses expériences sur l'iodure, le chlorure et le brômure d'argent, M. Herschel suggère l'idée d'essayer aussi le fluorure de ce métal : il pense que s'il était décomposé par la lumière, il pourrait bien se dégager du fluore, qui, en agissant sur le verre, donnerait peut-être une copie gravée du dessin primitif. Il prouve par l'expérience qu'il est possible d'obtenir des dessins photogéniques avec les sels d'or et de platine, et décrit la propriété remarquable dont jouissent les hydriodates, d'exalter l'action désoxidante de la lumière ou de la faire apparaître quand elle ne se manifeste pas.

4° *Analyse chimique du spectre solaire.* — On sait que cette action n'est pas la même pour tous les rayons, et l'on a attribué le pouvoir désoxidant le plus énergique aux rayons violets extrêmes. M. Herschel a trouvé que l'action chimique est réellement répandue dans toute l'étendue du spectre ; qu'elle ne dépend pas seulement du degré de réfrangibilité des rayons, mais encore d'autres circonstances physiques inhérentes à la nature du rayon, des milieux qu'il a traversés et des substances impressionnables sur lesquelles il agit.

En essayant d'arriver à constater l'existence, dans le spectre chimique, de parties inactives analogues aux raies noires de Fraunhofer, il a découvert plusieurs faits curieux. Le maximum d'action sur le

papier photogénique ordinaire, préparé avec le sel marin, ne se trouve pas au delà du violet, mais, au contraire, sur les confins du bleu et du vert, près de la ligne F de Fraunhofer. La limite visible des rayons violets semblait partager en deux l'image photographique imprimée sur le papier. Dans le violet visible, il y avait une espèce de minimum d'action à un tiers de distance de la ligne H de Fraunhofer, en allant vers G. Tout le rouge jusqu'à la ligne C était sans action. Les rayons orangés communiquaient au papier une teinte rouge de brique, qui passait ensuite au vert et au bleu foncé. Ces faits et tànt d'autres prouvent surabondamment que la photographie exige des objectifs parfaitement achromatiques, et qu'il ne faut pas désespérer de pouvoir reproduire un jour les couleurs naturelles.

5. *Étendue nouvelle du spectre visible.* — Au delà de l'extrémité violette, M. Herschel a distinctement aperçu un espace lumineux nouveau, ayant sa couleur propre distincte de toutes les nuances prismatiques, et que l'on pourrait désigner sous le nom de *gris de lavande*. Ces nouveaux rayons exercent une action chimique très énergique.

6. *Propriétés chimiques de l'extrémité rouge.* — Les rayons rouges du spectre ont une action chimique opposée à celle des rayons bleus, violets ou gris de lavande. Lorsqu'on mêle des rayons rouges à la lumière diffuse du jour, et que l'on soumet un papier sensible à l'action de ce mélange, il n'éprouve aucun changement; les deux influences contraires se neutralisent. Si le papier a été coloré à l'avance par la lumière solaire, il prend sous l'action des rayons rouges une forte teinte rougeâtre. Les divers autres rayons du spectre, mêlés aux rayons rouges, produisent sur le papier sensible des effets que seuls ils n'auraient pas pu déterminer. Sur du papier imprégné d'hydrobrômate de potasse, le spectre chimique a une longueur très considérable, et s'étend bien au delà du rouge extrême; la teinte communiquée est sensiblement uniforme dans la partie correspondante aux rayons visibles, de sorte que l'action de ces rayons est sensiblement la même. Sous l'influence de l'hydriodate de potasse, les divers rayons blanchissent les papiers, quelle que soit leur préparation, après qu'ils ont été noircis par l'action de la lumière. Si la solution d'hydriodate est très faible, l'action la plus énergique semble appartenir aux rayons les moins réfrangibles,

7. *Action des divers milieux absorbants sur les rayons chimiques.* — L'analyse des rayons chimiques du spectre par des milieux absorbants a démontré que les propriétés photogéniques des rayons qui traversent ces milieux ne sont pas en rapport direct avec leur coloration, et dépendent d'autres qualités encore mystérieuses. Ainsi, M. Herschel a souvent vu des rayons verts, et d'autres même plus réfrangibles, n'avoir aucun effet sur le papier sensible, quoiqu'ils produisissent un effet lumineux considérable. Il constata aussi que l'effet chimique des rayons est augmenté par leur passage à travers divers milieux, en particulier par une lame de verre mise en contact avec le papier photographique. Cet accroissement doit-il être attribué à la chaleur développée dans le verre, ou provient-il de ce que le verre a absorbé certains rayons négatifs ou capables d'un effet contraire? La question reste encore indécise.

Nous décrirons ailleurs l'actinographe de M. Herschel, ou le photomètre destiné par lui à l'enregistrement spontané des observations météorologiques. Dans une note qui fait suite à son mémoire, M. Herschel décrit un procédé qui permet d'analyser les rayons calorifiques du spectre, et de leur assigner leur place dans le spectre lumineux. Il consiste à exposer à la fumée une des faces d'une feuille mince de papier, puis à en soumettre la face blanche au spectre solaire, après l'avoir humecté d'alcool. Les rayons calorifiques, en desséchant plus rapidement les points où ils se rendent que le reste de la surface du papier, dessinent sur la face enfumée leur étendue et leur distribution par une apparence blanchâtre, qui contraste avec la teinte foncée que prend le reste de la surface quand les pores du papier ont absorbé le liquide. Cet effet s'étend beaucoup au delà de l'extrémité rouge. Ce qui frappe le plus dans ce spectre *thermique*, si on peut l'appeler ainsi, c'est l'existence de bandes de chaleur plus ou moins isolées, et distribuées à des intervalles presque égaux le long de son axe; cet effet peut être dû au prisme, à l'atmosphère, ou au spectre lui-même. Deux de ces bandes, ayant une forme ovale, sont situées : la première, à l'extrémité rouge du spectre; la seconde, à quelque distance au delà; elles sont assez mal isolées. Deux autres, mieux terminées et de forme ronde, sont placées à une plus grande distance, au delà des rayons rouges; et, enfin, une dernière, plus faible et moins distincte, est à un tel éloignement dans la

même direction, qu'elle serait à 422 degrés du rouge dans une échelle dont tout le spectre coloré de Newton occuperait 539 degrés.

En modifiant l'appareil dont il vient d'être question, en substituant au noir de fumée une matière colorée dissoute dans l'alcool, M. Herschel a réalisé un *thermographe fixe*, destiné à faciliter un grand nombre de recherches. Sous l'action des rayons calorifiques, l'alcool s'évapore ; la matière colorante pénètre les pores du papier, qui présente par là même plusieurs nuances indicatrices de la quantité plus ou moins grande de chaleur développée par les diverses portions du spectre. La matière colorante de la violette remplit parfaitement le but ; M. Herschel, avec son thermographe, a mis très nettement en évidence les phénomènes de la polarisation de la chaleur.

QUATRIÈME MÉMOIRE. —*De l'action des rayons du spectre solaire sur les couleurs végétales, septembre* 1842. — Ce mémoire renferme une longue série d'expériences sur un grand nombre de couleurs végétales extraites des fleurs et des feuilles de diverses plantes. La destruction de la couleur des préparations de gaïac a lieu aussi bien par l'action de la chaleur que par celle des rayons les moins réfrangibles du spectre solaire ; mais les rayons calorifiques sont néanmoins incapables de produire les effets chimiques que l'on obtient avec d'autres rayons doués de beaucoup moins de chaleur. M. Herschel a même prouvé que certaines sources de chaleur terrestre augmentaient à un plus haut degré que la chaleur solaire les effets de coloration produits par les rayons les plus réfrangibles.]

Si l'on étudie plus attentivement les effets photographiques produits par le spectre sur des papiers imprégnés de divers sucs de plantes, et recouverts ensuite de couches sensibles, on voit que l'action des divers rayons varie considérablement, tant sous le rapport de son intensité que sous le rapport de la distribution des portions actives. L'action d'abord est positive, c'est-à-dire que la lumière détruit la couleur en totalité ou en partie, en laissant pour résultat une teinte affaiblie entièrement insensible, ou qui ne s'impressionne que très lentement. De plus, l'action du spectre est bornée presque entièrement à la région occupée par les rayons lumineux ; les rayons placés au delà du violet et du rouge, si énergiques quand il s'agit des sels d'argent, sont sans efficacité par rapport aux couleurs végétales. Enfin, les rayons efficaces pour la destruction d'une couleur don-

née ont une tendance à produire la teinte complémentaire de la couleur détruite. La couleur jaune, par exemple, est mieux détruite par les rayons bleus ; la couleur bleue par les rayons rouges, orangés et jaunes ; les couleurs pourpre et rose par les rayons jaunes et verts.

Un papier imprégné d'une solution de citrate de fer et d'ammoniaque séché, puis plongé de nouveau dans une solution de ferrocyanate de potasse, devient susceptible de recevoir, avec une extrême rapidité, une image photographique positive. L'image négative, tracée sur le papier imprégné seulement de citrate ammoniacal de fer, faible d'abord et imperceptible, devient tout à coup visible et nettement prononcée lorsqu'on lave le papier avec une solution neutre d'un sel d'or. La vivacité des contours et la précision des détails ne laissent rien à désirer : les sels d'argent produisent un effet semblable, mais plus lentement, quoique avec plus d'intensité. M. Herschel propose de désigner ce nouveau procédé photographique sous le nom de sydérotypie.

Nous citerons encore un fait curieux observé par l'illustre physicien : un dessin à demi-teinte fut placé au dessus d'une feuille de papier imprégné d'un extrait alcoolique de pavot oriental, et abandonné, dans un cadre à glace, à l'action de la lumière, depuis le 19 août jusqu'au 19 octobre 1841. Lorsqu'on enleva le cadre, on ne put apercevoir aucune trace quelconque de dessin photographique, et il n'eut pas été possible de décider où avait été le haut et le bas du dessin. On mit alors le papier sous une cloche où l'on fit parvenir des vapeurs d'acide chlochydrique, et, après quelques minutes, on vit apparaître l'image dessinée d'un ton doux et agréable. Abandonnée à l'air dans un tiroir, cette image pâlit peu à peu, et, en janvier, elle était complétement effacée, On la replaça sous l'influence des vapeurs acides, et la couleur reparut de nouveau.

M. Herschel a été conduit par ces expériences à penser qu'il n'est pas impossible que la rétine elle-même soit photographiquement impressionnée par l'action de lumières suffisamment intenses, et que quelques uns des phénomènes des couleurs subjectives puissent provenir de la perception des changements réels produits dans l'organe de la vision par l'action des stimulants directs.

CINQUIÈME NOTE. — *Sur une préparation donnant des impressions invisibles qui apparaissent sous l'influence de l'haleine ou de la*

vapeur d'eau. — 1843. — Si l'on ajoute à une solution de nitrate d'argent ayant pour pesanteur spécifique 1,200, du tartrate acide de fer dissous au titre 1,023, il se forme un précipité qui se dissout en grande partie à l'aide de la chaleur. Si l'on sépare par le repos le sédiment noir insoluble, il reste un liquide d'un jaune pâle qu'une nouvelle addition de sel d'argent ne trouble pas. On ajoute de ce sel une quantité égale en volume à la moitié de la solution de tartrate de fer, et la liqueur obtenue se conserve dans l'obscurité sans altération. Si on l'étend sur du papier et qu'on l'expose encore humide à l'action du soleil pendant quelques secondes, on n'aperçoit aucun changement; mais bientôt, dans l'obscurité, la couleur se développe graduellement et devient très intense. Ce même papier, séché à l'ombre, est d'un jaune pâle verdâtre, et il a la singulière propriété de recevoir l'image invisible d'une gravure ou d'un dessin quelconque, après exposition au soleil d'une minute environ. Si l'on a retiré cette image avant qu'elle fût sensible, il suffira pour la faire apparaître de souffler sur le papier: elle apparaît alors comme par magie, avec une grande intensité de couleurs et une remarquable netteté de contours; on peut, au lieu de l'haleine, employer l'influence de la vapeur d'eau, en plaçant le papier, après son exposition au soleil, dans un buvard, dont on a humecté quelques feuillets en le plaçant sur de l'eau chaude. Quelques autres préparations de sels d'argent présentent des propriétés analogues, mais à un moindre degré d'efficacité.

SIXIÈME NOTE. — *Sur certaines améliorations dans les procédés photographiques et sur les rayons parathermiques du spectre solaire.* — 1843. — M. Herschel décrit d'abord le procédé particulier de photographie qu'il a désigné du nom de cyanotypie.

Il mêle des quantités égales en volume de solution concentrée de sublimé corrosif avec une solution de citrate de fer ammoniacal contenant une partie de sel pour onze d'eau : il ne se fait pas immédiatement de précipité, l'on peut en se hâtant laver le papier, qui doit être plutôt jaunâtre que bleuâtre, avec ce mélange et le faire sécher. Il est prêt alors à être employé, et se conserve sans altération. On l'expose à la lumière jusqu'à ce qu'un dessin bien visible, quoique léger, apparaisse, et que les bords du papier, si l'on copie une gravure, soient d'un brun pâle. On lave alors promptement le papier avec un gros pinceau trempé dans une solution concentrée de ferro-

cyanure de potassium étendue de trois fois son volume d'une eau légèrement gommée. La couche de ce liquide doit être légère, bien égale et rapidement étendue. On sèche à l'obscurité, et l'on obtient un fort beau dessin, qui est fixe et peut être immédiatement exposé à la lumière : après quelques jours, le soleil lui-même ne l'altère pas. Plus on le conserve, plus les détails les plus délicats se prononcent, et le dessin devient plus intense sans cesser d'être parfaitement distinct ; sa couleur passe graduellement du pourpre au bleu verdâtre.

Dans une expérience faite avec un papier photographique préparé au moyen du citrate ammoniacal de mercure, papier qui exige une lumière très-intense, l'auteur le trouva très-peu sensible. Une bande de ce papier, mise par moitié au soleil lorsque l'autre portion était abritée, ne prit qu'une faible couleur brune dans la portion exposée. Elle fut alors lavée avec une solution de nitrate de mercure : aussitôt la partie du papier qui avait reçu l'impression de la lumière commença à se colorer, et finit par prendre une teinte brune foncée, tandis que la portion abritée restait sans altération : elle semblait même être devenue insensible à l'action de la lumière. L'auteur trouva que l'eau partageait avec le nitrate de mercure ce singulier pouvoir de stimuler une impression photographique dormante. Au travers d'une bande de papier imprégné de citrate de mercure et tenue exposée au soleil sur une de ses moitiés jusqu'à ce qu'elle fut devenue d'un brun pâle, on traça deux lignes, l'une avec une solution étendue de nitrate de mercure, l'autre avec de l'eau de source : peu de temps après, toutes deux présentaient une couleur brune sur la portion exposée, tandis qu'il ne se produisit aucun effet sur l'autre portion. La même expérience réussit avec plusieurs variétés de papiers, et avec des mélanges à doses très-diverses.

Ce pouvoir de l'eau et du nitrate de mercure, d'exciter les impressions photographiques dormantes, est en proportion directe avec la force de l'impression primitive, et il est très-faible si celle-ci l'est aussi. L'auteur avait déjà montré que l'humidité renforce les teintes obtenues sur les photographies à sel d'or ; mais l'expérience suivante tend à rendre cette propriété bien plus apparente. Du papier lavé avec une solution de citrate de fer ammoniacal fut séché, lavé ensuite avec du chlorure d'or neutre, puis bien séché de nouveau à l'ombre. Il était alors presque insensible à la lumière, et une bande mise par

moitié du soleil n'avait éprouvé aucune altération apparente après plusieurs minutes; mais quand on souffla dessus, l'impression apparut très-forte et très-complète, devenant graduellement plus foncée, jusqu'à acquérir une grande intensité. L'argent peut être traité de la même manière. Cette influence de l'humidité peut être exercée par la vapeur contenue dans l'atmosphère, qui continue à agir lentement dans l'obscurité, sans autres limites que celles dues à la proportion de vapeur actuellement présente. Il se produit ainsi de très-belles photographies qui ressemblent aux daguerréotypies : les ombres offrent un changement de couleur qui a quelque chose de chatoyant; elles passent du brun verdâtre au noir, lorsqu'on les place plus ou moins obliquement au jour. Enfin, dans tous les procédés photographiques, on peut observer une action considérable de l'humidité pour accroître l'effet de la lumière, soit directement, soit indirectement.

Il y a une différence pourtant entre l'action stimulante de l'eau pure et celle du nitrate de mercure; c'est que celle-ci est permanente, tandis que la première s'affaiblit avec le temps, du moins si elle ne s'est exercée que dans l'obscurité : car si l'on expose les dessins une seconde fois au soleil, il n'y a pas de différence perceptible. D'un autre côté, lorsqu'on emploie le nitrate, la teinte brune passe souvent au noir foncé, même à l'obscurité et sans nouvelle exposition à la lumière solaire. Dans ce cas, les photographies ont une intensité et une opacité presque égales à celles de l'encre d'imprimerie.

Ce haut degré d'opacité et de teinte, joint à l'apparente insensibilité du fond, rend ces dessins particulièrement propres à servir d'intermédiaires pour multiplier les copies. Lorsque ces photographies, qui, en effet, sont négatives, sont employées dans cet état de transition comme modèles, loin d'être altérées par la transmission de la lumière, elles reçoivent, au contraire, du passage des rayons, plus de netteté et de mordant dans les contours. En saisissant le point convenable de sécheresse et en employant pour recevoir l'impression un papier bien sensible, on peut espérer de produire ainsi des dessins positifs parfaits; les essais faits par l'auteur l'ont convaincu de la bonté pratique de ce procédé.

Lorsqu'un dessin a été préparé par la méthode cyanotypique ci-dessus décrite, et avec le perfectionnement signalé de l'addition du

sublimé corrosif, on peut, au moyen de la chaleur, le transformer de dessin positif en dessin négatif : la couleur bleue passe alors au brun. Avec le temps, la couleur bleue reparaît, et le dessin redevient positif. L'auteur a attribué ce singulier effet à l'action de certains rayons spéciaux qui se trouvent surtout dans les portions rouges et orangées du spectre, et qui s'échappent aussi en abondance des corps chauffés au-dessous du rouge. Ces rayons ne sont pas des rayons de lumière, car ils sont invisibles, et ils diffèrent aussi des rayons calorifiques proprement dits qui se trouvent au-delà du spectre par des propriétés spéciales et beaucoup plus marquées. On peut dire qu'ils jouent, à l'égard des rayons calorifiques, le même rôle que les rayons photographiques vis-à-vis des rayons lumineux proprement dits ; et c'est pour exprimer ces rapports que l'auteur a proposé de les désigner sous le nom de *parathermiques*. Il imagine que ce sont là les rayons qui produisent ces remarquables influences moléculaires, auxquelles il faut attribuer les précipitations des vapeurs dans les expériences de MM. Draper, Moser et Hunt, et qui, une fois mieux étudiés, donneront la clef de la nature intime de ces forces qui résident à la surface des corps, et que M. Dutrochet appelle *forces épipoliques*. Il attribue aussi à ces rayons, passant de molécule à molécule dans l'intérieur des corps, la destruction des couleurs végétales à la température de l'eau bouillante, et ces innombrables transformations atomiques et isomériques qui ont lieu dans les substances organiques à des températures bien au-dessous de la chaleur rouge.

La distinction de ces rayons d'avec la lumière proprement dite exigeait qu'on leur donnât un nom particulier : celui de *lumière latente* ne présente aucun sens bien clair à l'esprit : celui de *lumière invisible* est évidemment un contre-sens.

Quant à la différence que l'auteur voit entre les rayons parathermiques et les rayons calorifiques proprement dits, il la trouve surtout dans la position toute spéciale que les premiers semblent occuper dans le spectre, sans nier, toutefois, qu'ils ne puissent se trouver dans d'autres parties à un degré beaucoup moindre. L'action des rayons calorifiques purs est rendue évidente par la rapide évaporation qu'ils excitent dans les liqueurs aqueuses ou alcooliques soumises à leur influence. Quelquefois cette action seule suffit pour opérer un effet chimique ; ainsi, pour le muriate rose de cobalt, on



sait qu'il suffit de la simple évaporation du liquide pour le faire passer au bleu ou au vert; et réellement on voit cet effet se produire dans le spectre, non pas seulement dans la région parathermique, mais dans tout l'espace où se rencontrent les rayons calorifiques, et en particulier au delà du rouge. Dans le plus grand nombre des cas, cependant, lorsqu'une action chimique se produit dans le spectre, elle est distincte et indépendante de celle des rayons calorifiques, et doit, selon l'auteur, être attribuée à des rayons spéciaux.

Dans une dernière note, datée de février 1843, M. Herschel a fait une étude attentive d'une image du spectre solaire obtenue sur plaque daguerrienne par M. Draper, sous le beau soleil de la Virginie du sud. Ce qu'il y a de plus saillant dans cette note, c'est cette conclusion : que l'impression ou l'image du spectre peut être attribuée à une pellicule homogène dans sa composition et variant d'épaisseur selon certaines lois : les couleurs, en effet, qui la dessinent, suivent les lois des couleurs des lames minces. Le reste de la note renferme une critique des idées de M. Draper; nous y reviendrons plus tard.

TRAVAUX DE M. EDMOND BECQUEREL.—PREMIER MÉMOIRE, PRÉSENTÉ A L'ACADÉMIE DES SCIENCES LE 30 JUILLET 1839. — *Recherches sur les effets de la radiation chimique de la lumière solaire, au moyen des courants électriques.* — On manquait de procédés physiques pour reconnaître l'action de deux substances l'une sur l'autre, sous l'influence de la lumière, dans le cas surtout où cette combinaison s'effectue dans un temps trop long et sans changement de couleur des substances, car alors on ne peut pas reconnaître l'influence des rayons chimiques d'après les produits formés. Si l'on pouvait observer les courants provenant de la combinaison ou de la séparation des éléments sous l'influence des rayons chimiques, on aurait un moyen de reconnaître et d'étudier la réaction des diverses substances. Tel est le problème que M. E. Becquerel s'est efforcé de résoudre. Deux liquides d'inégale densité, conducteurs de l'électricité, étant superposés l'un sur l'autre dans un vase, si un des liquides renferme une substance capable de réagir sur une substance qui se trouve dans l'autre liquide sous l'influence des rayons chimiques, dès l'instant où l'on fera pénétrer ces rayons dans la masse, ils réagiront l'un sur l'autre à la surface de séparation, en produisant un courant

électrique qui sera accusé par un galvanomètre dont les deux extrémités sont terminées par des lames de platine plongeant dans chaque liquide. Cette idée est tout à fait neuve, et les expériences de M. Becquerel ont mis en évidence l'influence de la lumière sur les réactions d'un grand nombre de substances, du perchlorure de fer, par exemple, et d'autres chlorures sur l'alcool. Vogel avait déjà remarqué le fait curieux suivant : quand on fait passer un courant continu de bulles de chlore dans l'alcool, et que celui-ci est saturé de chlore ; si les rayons solaires viennent frapper le vase, chaque nouvelle bulle de gaz qui arrive produit une faible explosion, avec flamme rouge et dépôt de charbon. M. Edmond Becquerel, à l'aide de son instrument, étudia l'influence de quelques écrans, et s'assura que la radiation chimique, semblable à la radiation calorifique, après avoir traversé un écran d'une certaine substance, traverse plus facilement un autre écran de cette même substance ; ou, en d'autres termes, qu'à partir d'une certaine épaisseur, différente probablement pour chaque corps, la radiation chimique n'éprouve plus d'altération, quelle que soit l'épaisseur de l'écran.

Il démontra encore : 1° que l'ordre des écrans colorés qui laissent passer les rayons chimiques est le même que celui des écrans qui laissent passer la radiation phosphorogénique de l'étincelle électrique ; 2° que les écrans de nature différente, ou de différentes épaisseurs, produisent des effets différents : ainsi, les écrans suivants laissent passer une somme de quantités chimiques représentées par les nombres ci-joints : verre blanc, 58,6 ; cristal de roche enfumé, 79,4 ; plaque de chaux sulfatée, 58,5 ; mica, épaisseur 0m,07, 77 ; papier de gélatine, 42,5 : on a représenté par 100 le nombre des rayons chimiques incidents.

M. Edmond Becquerel affirme que l'appareil employé par lui est bien un appareil *mesureur*, et non pas seulement un appareil *indicateur*, en ce sens que l'intensité du courant est réellement proportionnelle à l'énergie de l'action chimique.

SECOND MÉMOIRE. — *Sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires.* — Ce second mémoire jette des nuages sur les conclusions affirmatives du premier. Les deux lames de platine, en relation avec les extrémités du galvanomètre, éprouvent elles-mêmes les effets de la radiation, et donnent naissance à un

second courant, dont les effets s'ajoutent à ceux du premier ou les neutralisent en partie : l'instrument de M. E. Becquerel n'est donc réellement pas comparable ; et nous eussions admis avec beaucoup de peine qu'il le fût, alors même que le jeune savant ne l'aurait pas reconnu lui-même. Suivant lui, la seconde note mettrait en évidence les faits suivants : 1° des rayons qui accompagnent les rayons les plus réfrangibles de la lumière solaire font éprouver à des lames métalliques plongées dans un liquide une action telle qu'il en résulte des effets électriques auxquels on ne peut attribuer une origine calorifique ; 2° la décomposition du chlorure, du brômure et de l'iodure d'argent sous l'influence de la lumière, produit des effets électriques qui peuvent servir à la comparaison des rayons chimiques actifs. M. Becquerel croit qu'il pourra éliminer l'action de la radiation sur les lames métalliques, et rendre à son appareil sa valeur première ; nous ne sommes pas du tout de son avis.

TROISIÈME MÉMOIRE. — *Sur les rayonnements chimiques qui accompagnent la lumière solaire et la lumière électrique.*—2 novembre 1840. — L'auteur a tiré de ses recherches les conséquences suivantes :

1° Les rayons chimiques qui accompagnent la lumière solaire et qui agissent sur les sels d'argent, comprennent au moins deux ordres de rayons : d'abord, les rayons chimiques ordinaires, ou *excitateurs ;* ensuite, d'autres rayons, que l'on peut appeler *continuateurs*, ou qui ne font que continuer une action commencée sous l'influence des premiers ;

2° Ces rayons continuateurs sont placés, par leur réfrangibilité, dans la partie supérieure du spectre solaire, c'est-à-dire qu'ils accompagnent les rayons rouges, orangés, jaunes, verts, peut-être aussi les rayons bleus les moins réfrangibles ; mais, dans ce dernier cas, ils se confondent avec des rayons excitateurs. On sait, en effet, que ces derniers accompagnent généralement les rayons les plus réfrangibles de la lumière, et il y en a qui, dans le spectre solaire, sont même rejetés au delà du violet ;

3° Lors de l'action des écrans, il s'en trouve qui laissent passer, les uns les rayons continuateurs, les autres les deux ordres de rayons ;

4° Les rayons continuateurs continuent aussi une action chimique

commencée sous l'influence de l'agent chimique qui accompagne la lumière électrique, et peuvent servir à reconnaître et analyser l'action chimique de ce dernier agent.

Pour donner une idée plus complète de ces recherches, nous citerons une des expériences de M. Becquerel. Il a principalement opéré sur du papier de brômure d'argent, préparé en étendant successivement sur une feuille de papier une couche d'une solution aqueuse de brômure de potassium, puis de nitrate d'argent, et faisant sécher après l'application de chaque couche. On projetait sur la surface de ce papier le spectre solaire provenant du passage d'un faisceau lumineux à travers un prisme de verre ordinaire; et, en l'examinant, au bout de quelques minutes, on le voyait coloré dans les rayons bleus, indigos, violets. Mais si, avant de l'exposer dans le spectre, on le laisse impressionner légèrement à la lumière diffuse, il n'en est plus de même, et la coloration a lieu, non-seulement dans les rayons les plus réfrangibles, mais encore dans la partie supérieure du spectre jusqu'au rouge. Si l'on place le papier sous des écrans de diverses nuances, il se colore différemment, suivant la nature de l'écran; et des papiers semblables, placés sous divers écrans, mettent des temps très-différents pour parvenir à une même phase de coloration. Ces faits étaient déjà connus. M. Becquerel a vu de plus qu'il existe certains écrans tels, que sous leur influence la partie déjà impressionnée de la bande de papier sensible continuait seule à se colorer, tandis que l'autre, qui ne l'avait pas été primitivement, restait blanche. Sous un verre rouge qui ne laissait passer à peu près que les rayons lumineux rouges, après une demi-heure d'exposition au soleil, la bande primitivement impressionnée par la lumière se colorait davantage; la partie non primitivement impressionnée était restée complétement blanche.

Les recherches ultérieures d'un grand nombre de physiciens ont prouvé efficacement que cette distinction de rayons excitateurs et continuateurs n'a rien d'absolu et de rigoureux; qu'on ne peut lui donner qu'une signification relative, parce que les mêmes rayons peuvent, par rapport à différentes substances ou relativement à d'autres rayons, exciter tour à tour ou continuer simplement l'impression produite. M. Becquerel a remarqué lui-même, dans un autre mémoire, que l'action des rayons excitateurs s'arrête, pour les plaques

simplement iodurées, vers la limite de l'indigo, près de la raie G de Fraunhofer, tandis que pour les plaques rendues plus sensibles par le chlore ou le brôme, elle se prolonge jusqu'en E dans le bleu extrême, du côté du rouge.

QUATRIÈME MÉMOIRE. — *Sur la constitution du spectre solaire.* — 13 *juin* 1842. — Nous reproduisons textuellement les conclusions de M. Becquerel :

« D'après les résultats que j'ai rapportés dans ce mémoire, on voit que, pour les rayonnements chimiques et phosphorogéniques qui agissent sur des substances impressionnables quelconques, si l'on considère chaque partie de même réfrangibilité de ces différents spectres, on la trouve traversée par les mêmes raies ou espaces sans rayons que la partie correspondante dans le spectre lumineux. Il est donc probable que les rayons de même réfrangibilité sont absorbés en même temps par les différentes substances qu'ils traversent, et que la cause qui fait que certains rayons manquent dans la lumière solaire, est aussi celle qui produit la disparition de ces rayons dans les autres rayonnements.

» Je n'ai pas encore résolu complétement la question relative à la chaleur rayonnante et à la détermination des raies dans le spectre calorifique, mais je m'en occupe actuellement, et j'espère publier incessamment tous les résultats auxquels ces recherches m'auront conduit.

» On avait admis généralement que ces rayonnements qui accompagnent la lumière étaient différents les uns des autres, et que, suivant telle ou telle substance sensible, les rayons actifs étaient aussi différents ; mais je ne crois pas que la question soit aussi complexe ; je le suppose du moins. En effet, les phénomènes lumineux, d'après la théorie des ondulations, dépendent des vibrations des molécules du corps éclairant, lesquelles sont transmises à la rétine par l'intermédiaire de l'éther, dont les molécules sont elles-mêmes en vibration. Fresnel, dont les beaux travaux ont contribué à faire triompher cette théorie, avait avancé que les effets chimiques produits sous l'influence de la lumière étaient dus à une action mécanique que les molécules de l'éther exercent sur les atomes des corps, de façon à leur faire prendre de nouveaux états d'équilibre dépendants de la nature et de la vitesse des vibrations auxquelles ils sont soumis. Cette idée

lui avait été suggérée par une expérience remarquable de M. Arago, dont le résultat était de montrer que les rayons chimiques qui influencent le chlorure d'argent interfèrent comme les rayons lumineux.

» Je crois que l'hypothèse de Fresnel est exacte et même qu'elle peut être plus étendue, surtout si l'on considère que les rayons chimiques et phosphorogéniques ont les mêmes propriétés physiques que les rayons lumineux : ainsi ils sont soumis aux lois physiques de la réflexion, de la réfraction, de la double réfraction, de la polarisation et des interférences, de même que ces rayons ; et de plus, comme nous l'avons vu dans ce mémoire, les spectres de ces différents rayonnements ont les mêmes raies.

» Ainsi il serait plus simple de supposer :

» 1° Qu'un faisceau de rayons solaires est la réunion d'une infinité de rayons de diverse réfrangibilité, chaque rayon provenant d'ondulations de l'éther n'ayant pas la même vitesse.

» 2° Qu'en réfractant un faisceau de rayons solaires à travers un prisme, on a le spectre solaire qui jouit de diverses propriétés, par suite de son action différente sur les corps extérieurs.

» 3° Que suivant telle ou telle substance dont les molécules sont réunies en vertu de faibles affinités, telles que des sels d'argent, d'or, de mercure, etc., les rayons solaires agissent d'après les vitesses d'ondulation qui peuvent se transmettre aux molécules de matière, et, par conséquent, entre telle ou telle limite de réfrangibilité. J'ai appelé *spectre chimique* l'ensemble des rayons qui affectent une substance donnée.

» 4° Que les phosphorescents devenant lumineux par suite du mouvement moléculaire imprimé à leurs molécules, mouvement qui donne lieu à une séparation des deux électricités nécessaires au maintien de l'équilibre moléculaire et dont la neutralisation forme les lueurs que nous observons, on pourrait considérer l'action des rayons solaires sur ces corps comme analogue à celle de ces rayons sur les corps chimiquement impressionnables, avec cette différence seulement que cette action mécanique des molécules de l'éther se transmet à ces corps sans décomposition chimique. Alors, suivant leur nature, ces substances phosphorescentes sont impressionnables entre telle ou telle limite de réfrangibilité dans le spectre solaire.



» 5° Si, en outre, on considère la rétine comme un organe qui perçoit les vibrations de l'éther, elle n'est impressionnable que par des rayons compris entre certaines limites de réfrangibilité, et les rayons actifs forment un spectre qui, dans ce cas, se trouve être le spectre lumineux.

» Ainsi, d'après cette hypothèse, on ramènerait tous les effets produits sous l'influence de la lumière à l'action d'un même rayonnement sur les différents corps, et il y aurait autant de spectres qu'il y a de substances impressionnables. Cette manière de voir se vérifie sur tous les corps phosphorescents et sur ceux dont l'état moléculaire change sous l'action des rayons solaires. Quant aux rayons lumineux, ou qui agissent sur la rétine, nous ne pouvons juger que d'après notre propre sensation ; mais il est probable que les rétines des différents êtres qui sont à la surface du globe ne sont pas toutes sensibles entre les mêmes limites de réfrangibilité. Nous en avons des exemples, entre autres, dans les poissons qui vivent au fond des mers et qui voient à se conduire là où il ne pénètre plus aucun des rayons qui seraient perceptibles à nos organes. »

Nous avons déjà rendu compte de la discussion à laquelle ce mémoire donna lieu, et des conséquences que M. Arago crut devoir en tirer. A part l'existence bien prouvée des raies dans le spectre chimique, il ne contient aucun fait nouveau. M. Herschel avait déjà reconnu que le maximum d'action ne se trouve pas à la même place dans le spectre chimique engendré sur diverses substances; que la longueur de ce spectre varie d'une substance à l'autre ; qu'il s'étend plus ou moins vers l'extrémité rouge, au point même de la dépasser, comme dans le cas de l'iodure de potassium. Seebeck avait constaté que les rayons rouges peuvent éteindre la phosphorescence; c'est donc à lui qu'appartient la gloire de la découverte des rayons antagonistes, ou doués de propriétés contraires.

CINQUIÈME MÉMOIRE. — *Des effets produits sur les corps par les rayons solaires.*—23 octobre 1843.—Après avoir rappelé succinctement tout ce que l'on sait à l'égard de l'action du spectre solaire sur les substances chimiquement sensibles, M. E. Becquerel donne une nouvelle description de l'actinomètre électro-chimique, qui permet d'étudier l'action des rayons solaires sur les sels d'argent insolubles, à l'aide des effets électriques produits dans la décomposition chimi-

que de ces substances, même lorsque cette décomposition ne peut être observée par aucun des moyens connus. Il expose ensuite avec de grands développements les faits qu'il a observés, relativement à l'action des écrans blancs transparents sur les rayons de diverse réfrangibilité, agissant chimiquement sur les substances impressionnables. Il est arrivé à ce fait remarquable que ces écrans, lorsqu'ils agissent par absorption, n'exercent leur action absorbante que sur les rayons situés au delà du violet visible, et que les rayons les plus réfrangibles sont les éléments les plus absorbables. Pour mettre ce fait hors de doute, il a opéré sur un grand nombre de substances solides et liquides, sous forme d'écrans : parmi celles qui jouissent au plus haut degré du pouvoir absorbant sur les rayons dont la réfrangibilité est plus grande que celle de la raie H de Fraunhofer, il cite, parmi les liquides, l'essence d'amandes amères, la créosote, et une solution de sulfate acide de quinine ; parmi les solides, la dichroïte. Il a fait usage de prismes de différente nature, et il a pu ainsi reconnaître qu'en même temps qu'ils agissent comme prismes pour disperser les rayons solaires, ils se comportent encore comme écrans. En pouvait-il être autrement? En étudiant l'action des écrans colorés sur les rayons de diverse réfrangibilité, il a trouvé constamment pour ces écrans, comme pour les écrans incolores, que lorsqu'une partie quelconque du spectre lumineux est absorbée ou détruite par une substance quelconque, la partie des rayons chimiques de même réfrangibilité l'est également.

Les lois observées dans l'action chimique de la lumière sont les mêmes pour la phosphorescence, de sorte qu'il existe une dépendance mutuelle entre le rayonnement phosphorogénique et les rayons lumineux et chimiques, dépendance telle qu'il semble qu'on peut conclure des faits nombreux observés, que ces rayonnements sont un seul et même agent, dont l'action se modifie suivant la nature de la matière sensible exposée à son influence et le genre de modification dont cette substance est susceptible. D'après cette hypothèse, les divers effets que l'on observe dans cette foule de phénomènes remarquables auxquels donne naissance l'action des rayons solaires, proviendraient de la différence qui existe entre les matières sensibles, et non de modifications dans l'agent producteur.

Nous rapprocherons de ces recherches une note plus importante

publiée par M. Malaguti, en septembre 1839, et relative à l'action des écrans sur les rayons chimiques.

Le savant chimiste a constaté de la manière la plus évidente l'influence des écrans liquides sur les effets chimiques de la lumière diffuse. Pour juger de la phase de coloration à laquelle la substance impressionnable arrive, il s'est fait des papiers étalons inaltérables à la lumière, et au milieu desquels il place le papier chimique ; puis il compte le temps employé par ce dernier pour atteindre la nuance du papier étalon, au sein duquel il disparaît. Le papier étalon est coloré par un mélange de carbonate de plomb, d'encre de Chine et de laque de garance délayée dans de l'eau mucilagineuse. On prépare le papier chimique en le plongeant d'abord dans de l'alcool anhydre légèrement acidulé par de l'acide chlorhydrique ; puis, lorsqu'il est sec, dans une dissolution faible de nitrate d'argent neutre ; on le fait ensuite sécher de nouveau dans l'obscurité.

M. Malaguti plaçait son papier sensible au foyer d'une chambre noire, et il avait toujours soin d'opérer à la fois sur deux rectangles de papier, l'un sous l'écran, l'autre derrière l'écran dont il voulait étudier l'influence. Les nombres suivants expriment le temps après lequel la coloration normale se produisait, suivant la nature de l'écran : air, 1 ; eau distillée, 0,75 ; acide chlorhydrique, 1,23 ; acide azotique, 1,48 ; essence de térébenthine, 2,05 ; essence de citron, 2,85 ; essence de lavande, 3,14 ; créosote, 3,95. L'eau, comme on le voit, avait un pouvoir accélérateur. L'alcool absolu, l'esprit de bois, le naphte, l'éther sulfurique, l'acide sulfurique, l'acide acétique cristallisable et quelques autres substances, n'ont donné aucun indice d'action retardatrice.

TRAVAUX DE M. MOSER. — Les mémoires de M. Moser doivent être placés au premier rang parmi les productions originales des temps modernes ; il a fait faire à la science un pas de géant. En soulevant le premier coin du voile, et dotant sa patrie de la plus merveilleuse industrie, du plus étonnant des arts, M. Daguerre a conquis une gloire immortelle ; M. Moser, en éclairant d'une lumière inattendue ce vaste champ de découvertes, en nous forçant à ne voir qu'un simple cas particulier, qu'un petit corollaire, dans ce qui avait été pour nous l'objet d'une si vive admiration, acquiert à son tour des droits sacrés aux hommages et à la reconnaissance du monde savant,

Honneur à la France et au génie inventif ! Honneur à l'Allemagne et aux recherches profondes !

Le premier mémoire du professeur de Kœnigsberg appartient, malgré ses défauts, à cette classe de dissertations que M. Arago désigne sous le nom de *master-pièce*, morceau de maître ; c'est un monument, nous le reproduirons, par conséquent, dans toute son étendue : nous serons moins généreux pour les autres, qui renferment, sinon des erreurs, au moins des déductions forcées, des hypothèses inadmissibles.

PREMIER MÉMOIRE. — *Sur le procédé de la vision et les effets de la lumière sur tous les corps.* — 1842. — « Maintenant qu'on étudie avec ardeur les effets de la lumière sur une classe nombreuse de substances désignées sous le nom de *chimiques*, la question suivante se présente d'elle-même à l'esprit. La rétine ne serait-elle pas une de ces substances, ne serait-elle pas impressionnée d'une manière analogue par l'action de la lumière ? Le nerf optique conduit-il à l'organe central les *vibrations* de la lumière ou bien la *sensation* de ses effets matériels ? Il me semble que beaucoup de phénomènes physiques de la vision qui ne s'accordent pas avec l'idée de vibrations excitées, deviennent facilement explicables dans l'hypothèse de modifications physiques senties.

» Pour ne citer préalablement qu'un fait, j'indiquerai l'influence du *temps* sur le phénomène de la vision : influence telle qu'on n'aperçoit pas instantanément les objets extérieurs et que leur couleur dépend de la durée de l'observation ; telle, enfin, que les images ne disparaissent pas avec les objets, mais continuent d'exister encore pendant un temps plus ou moins long sur la rétine. A la suite de cet article, j'essaierai de pousser aussi loin que possible l'analogie entre l'effet de la lumière sur la rétine, et son effet sur d'autres substances qu'à présent on commence à étudier, sans que je m'avance cependant plus que mes recherches multipliées ne le permettent ; car je ne me dissimule pas que le sujet que je vais traiter est tel, que peu d'esprits sont disposés à m'écouter sans préventions ; des préjugés enracinés repousseront longtemps cette assertion : « que la lumière
» produit des changements matériels sur la rétine, changements
» réels quoique peu saisissables, comme je crois pouvoir le prouver. »
J'ai donc des précautions à prendre, des ménagements à garder ; et,

pour donner quelque poids à une opinion qui est pour moi l'expression des faits, je me vois dans la nécessité de remonter plus haut, de répéter des expériences déjà faites, et qu'on n'a pas assez approfondies. La théorie que je veux établir repose sur ces trois propositions fondamentales :

» 1° Les rayons violets et bleus de la lumière n'exercent pas seuls et à l'exclusion des autres une influence chimique, ou, si l'on prétend distinguer encore dans le spectre des rayons lumineux et des rayons chimiques, il faudra dire que les rayons chimiques *ne se trouvent pas exclusivement* dans les rayons du spectre qui se réfractent le plus.

» 2° Il n'est pas nécessaire, et il n'arrive même pas du tout dans les phénomènes les mieux observés, que la lumière produise une séparation matérielle de substances chimiquement unies. Les effets de la lumière sont plutôt tels, ainsi que je le prouverai, qu'on peut les reproduire par des causes purement physiques, de telle sorte que l'idée d'une décomposition chimique n'est plus soutenable.

» 3° L'effet le plus prolongé de la lumière paraît attaquer seulement la première surface des substances, et il ne semble pas même pénétrer la couche d'iodure, ordinairement si mince, qui se forme à la surface des plaques d'argent.

» Ces trois assertions une fois prouvées, il est clair que les plus fortes objections contre ma théorie seront écartées. On ne s'étonnera plus de voir que toutes les couleurs exercent leur influence sur l'œil, tandis que les autres matières sensibles à l'effet de la lumière ne subissent d'action que de la part de certaines couleurs, particulièrement du bleu et du violet : cela paraîtra fort simple quand j'aurai prouvé surtout que chacune des couleurs exerce sur l'iodure d'argent une action particulière, et qu'on peut constituer cette substance dans un tel état qu'elle soit également affectée par tous les rayons.

» Les propositions 2° et 3° expliqueront comment les modifications purement physiques de la rétine, tout en restant en elles-mêmes presque insignifiantes, peuvent persister longtemps, de telle sorte que la rétine ne puisse revenir à son état normal qu'après des minutes, des heures, des jours même et des mois.

» Avant de passer aux expériences, je dirai un mot sur la manière la plus convenable de les exécuter.

» Il paraîtrait plus commode de se servir de papiers sensibles et d'une chambre obscure ; mais cette méthode n'est pas la plus avantageuse, elle n'exclut jamais l'incertitude, du moins quand les phénomènes sont difficiles à saisir. Le seul procédé rationnel dont on puisse se servir est celui de M. Daguerre, perfectionné comme nous allons le dire.

» On prend une cassette d'une substance quelconque, d'environ 5 centimètres de profondeur, et dont la grandeur soit proportionnée à celle des plaques d'argent dont on veut se servir ; on fixe au fond de cette cassette un carreau de verre recouvert d'une étoffe de laine que l'on saupoudre d'iode, et qu'ensuite on recouvre d'un deuxième carreau de verre absolument semblable au premier : l'iode pénètre bientôt l'étoffe et lui donne une teinte noire. Il suffit alors de mettre la plaque d'argent sur le second carreau de verre, pour obtenir une couche d'iodure d'argent couleur d'or, et ce qui est essentiel, dans un laps de temps qui ne varie que peu, si la température ne varie pas elle-même brusquement. Avec mon appareil, ce résultat s'obtient en 60 ou 70 secondes.

» Dans beaucoup d'expériences, il est à souhaiter que l'iodure d'argent soit très-sensible ; et, pour arriver à cette sensibilité exaltée, il faut recourir au chlorure d'iode, préparé comme il suit :

» On prend un flacon d'une embouchure aussi grande que possible, et qui se ferme exactement par un bouchon usé à l'émeri ; on y met une petite quantité d'iode, et l'on place ensuite ce petit flacon laissé ouvert dans un autre plus grand, où se trouve du chlorure de calcium. On verse quelques gouttes d'acide sulfurique sur le chlorure, après quoi on ferme le grand flacon, et on le laisse de un à trois jours sans le mouvoir ; on obtient ainsi dans le petit flacon un des deux composés de chlore et d'iode, le solide ou le liquide, et souvent tous les deux à la fois. Si, après avoir exposé la plaque d'argent à l'influence de l'iode, on la fait promener pendant 20 à 30 secondes sur le chlorure d'iode, elle donnera des images dont le temps de formation sera de quelques secondes seulement, et restera sensiblement le même tant que la lumière conservera la même intensité.

» Lorsque, dans la chambre obscure, on expose une plaque d'argent iodée pendant un temps suffisant à l'action de la lumière, on

obtient, comme on sait, une image qui se dessine de manière que les parties claires paraissent sombres, tandis que les parties réellement sombres paraissent brillantes, parce que, sur tous les points où la lumière n'a point agi, l'iode conserve sa couleur primitive, qui est le jaune clair. Ces sortes d'images, qui, sous le rapport de l'art, n'offrent aucun intérêt, sont ce que j'appellerai, avec M. Herschel, des *images négatives*. La découverte de M. Daguerre consiste en ce qu'avant la formation de cette image négative, c'est-à-dire à une époque où l'on ne distingue encore sur la plaque d'argent iodée aucune trace d'effet, il n'en existe pas moins un commencement d'action, de sorte que tous les points attaqués par la lumière ont déjà acquis la faculté de précipiter le mercure. Il est ici un fait capital qu'il faut faire ressortir, et que les belles expériences de M. Becquerel fils ont rendu plus évident, c'est que la lumière peut produire sur l'argent iodé des modifications que certains rayons particuliers rendront seuls appréciables et visibles. Si la lumière n'agit pas assez longtemps sur les plaques d'argent, les vapeurs de mercure ne peuvent se précipiter, et on pourrait croire que l'objet qu'on voulait reproduire n'a encore exercé aucune influence. Ce serait une erreur, car en exposant cette plaque d'abord sous un verre rouge aux rayons du soleil, puis à l'action de la vapeur du mercure, M. Edmond Becquerel a obtenu des images positives ou négatives, suivant que le temps de l'exposition au soleil a été plus ou moins grand. La plaque iodée avait donc réellement subi une première modification que les rayons rouges continuent.

» En partant de cette idée, que les effets chimiques de la lumière sont dus à l'action des rayons violets et bleus, M. Becquerel se trouvait conduit à admettre deux sortes de rayons, les rayons *excitateurs*, liés aux couleurs violette et bleue du spectre, et les rayons *continuateurs*, concentrés dans les parties rouges et jaunes.

» En répétant les expériences de M. Becquerel, je les ai trouvées en général très-exactes. J'ai trouvé, de plus, que l'effet des verres *jaunes* est bien différent de celui des verres *rouges*. J'en possède qui, lorsqu'on regarde à travers, donnent un jaune pur, et d'autres qui donnent un jaune rougeâtre. L'effet de ces derniers est semblable à celui des verres rouges : seulement, ils laissent passer beaucoup de lumière blanche qui noircit l'iodure d'argent. Si l'on expose au

soleil, sous un verre d'un jaune pur, une plaque d'argent iodée, qu'on a laissée dans la chambre obscure presque assez longtemps pour obtenir, à l'aide du mercure, une image positive, et qu'ensuite on l'expose au soleil, on arrive à un résultat fort remarquable : bien qu'au commencement de l'opération il ne se montre sur la plaque aucune trace d'image, il se forme dès lors et rapidement une image *négative* qui disparaît pour faire place, dix à quinze minutes après, à une image *positive*, c'est-à-dire dans laquelle les parties claires de l'objet paraissent claires, et les parties sombres paraissent sombres. Ces images positives se recouvrent toujours, sous les verres jaunes, d'une couche noirâtre ; à cela près, elles sont d'une finesse et d'une précision admirables. Il m'a été impossible, même en prolongeant indéfiniment l'action du soleil, d'obtenir avec des verres rouges l'image positive, que les verres verts me donnaient, quoique plus lentement que les verres jaunes.

» D'un grand ensemble de faits, il résulte : 1° que l'iodure d'argent ordinaire n'est modifié que par les rayons violets et bleus ; ces modifications sont d'abord imperceptibles : les vapeurs de mercure les mettent en évidence ; 2° qu'on peut distinguer deux degrés dans l'impression reçue par l'iodure d'argent : cet iodure est d'abord modifié de telle manière que les rayons rouges et orangés exercent leur influence sur lui, aussi bien que les rayons bleus et violets ; les rayons jaunes ne montrent point encore d'influence, et si l'on retire la plaque trop tôt de la chambre obscure, les rayons jaunes seront tout-à-fait inactifs. Plus tard, au contraire, les rayons jaunes et verts agissent comme les autres ; cette action apparaît à peu près au moment où l'iodure d'argent modifié acquiert la faculté de précipiter les vapeurs de mercure. A cet instant donc, toutes les couleurs influent sur l'iodure d'argent. Il n'est dès lors plus permis d'attribuer à certains rayons du spectre une influence chimique exclusive. Dans la suite de cet article, je tâcherai de démontrer d'une manière encore plus concluante combien l'hypothèse admise des rayons chimiques est peu fondée.

» L'effet commun de tous les rayons violets, bleus, etc., est de noircir l'iodure d'argent jaune. Cet effet une fois produit, ils n'exercent plus aucune action. On est loin de s'accorder sur la nature de la matière noire fixée sur la plaque iodée : quelques-uns la prennent

pour de l'argent pur; d'autres veulent que ce soit une combinaison différente de l'argent ou de l'iode, un autre iodure d'argent. Je regarde comme plus probable l'opinion qui affirme que l'iodure d'argent n'éprouve, par l'effet de la lumière, qu'un changement isomérique. On verra encore plus clairement dans la suite que cette matière ne peut être de l'argent pur : j'en donnerai ici une seule preuve : les rayons jaunes changent l'image *négative* en image positive, et font reprendre à l'iodure noir sa couleur primitive, ce qu'il est impossible d'obtenir avec de l'argent pur. Il serait à désirer qu'on connût mieux la nature précise de cette matière noire.

» Pour analyser l'effet propre des rayons jaunes et verts, il n'est pas nécessaire de recourir aux verres colorés, car leur effet commence quand les autres rayons n'agissent plus : on peut opérer avec la lumière blanche qui n'est pas décomposée, c'est-à-dire avec la lumière du soleil à son état naturel. Voici à ce sujet quelques expériences frappantes.

» Une plaque iodée fut exposée au soleil jusqu'à ce qu'elle fût devenue noire, ce qui eut lieu en peu d'instants, puis on en déroba une moitié à l'influence du soleil : quelques minutes plus tard, la moitié découverte était déjà devenue beaucoup plus claire que la partie couverte. Cette décoloration continua pendant quelque temps, et à la fin la plaque, auparavant noire, reprit son aspect jaune-verdâtre. Cet effet est certainement produit par les rayons jaunes et verts du soleil.

» On laissa noircir au feu une plaque d'argent iodée jusqu'à ce que le noircissement n'augmentât plus, après quoi on la mit dans une chambre obscure dirigée vers des maisons. Lorsqu'on la retira vingt-quatre heures après, elle présentait, comme on devait s'y attendre, une image *positive* et très-précise, avec les détails ordinaires. Les parties claires des objets avaient une couleur gris d'acier, et les parties sombres étaient noires.

» L'expérience suivante est tout-à-fait surprenante, quoique facile à expliquer par l'effet déjà mentionné des rayons jaunes et verts. Qu'on iodure une plaque d'argent, qu'on la mette dans une chambre obscure, alors que le soleil brille, et qu'on l'y laisse pendant une demi-heure, une heure, et même plus longtemps, de manière à obtenir une image négative fortement caractérisée; qu'on expose ensuite

cette plaque au soleil, et, au bout de quelques minutes, l'image négative disparaîtra pour se changer en une image positive, de force égale, dont les parties claires sont d'un vert bleuâtre, et les parties sombres d'un rouge brun.

» Il n'est pas possible de décider encore si les lois trouvées pour l'influence de la lumière sur l'iodure d'argent sont des lois générales. Aux différences près qui résultent de la diversité des couleurs, la solution alcoolique de gaïac m'a donné des résultats très analogues à ceux que j'avais obtenus avec l'iodure d'argent. Quand on étend cette solution sur des papiers, ils ont au commencement une couleur rougeâtre, qui se change, par la lumière du soleil, en vert-thé. Les rayons qui exercent les premiers leur influence sont les violets, les bleus et les verts. Le papier rougeâtre acquiert alors une couleur verte tirant sur le bleu, et par l'effet des rayons violets il devient même bleu.

» Le papier qui a acquis par la lumière du soleil la couleur vert-thé, exposé au soleil, sous des verres rouges et jaunes, échange cette couleur contre une couleur rose clair, tirant un peu sur le brun. Ainsi le rouge et le jaune opèrent sur le gaïac, qui est déjà modifié par les rayons violets, bleus et verts, comme le vert et le jaune sur l'iodure d'argent noirci. J'en avais conclu que le soleil, qui a déjà changé le papier rougeâtre en papier vert, lui rendrait avec le temps sa couleur primitive; mes conjectures se sont vérifiées.

» Ma première proposition est donc démontrée : *il n'y a pas de rayons chimiques à l'exclusion des autres*. J'arrive maintenant à ma seconde assertion : je vais prouver que l'effet de la lumière ne consiste pas nécessairement dans la séparation de deux substances chimiquement unies.

» Nous avons vu que l'action de la lumière sur la surface des plaques se manifeste surtout par la couleur noire qu'elle communique à l'iodure d'argent et aux autres composés de ce même métal. Cette modification est certainement remarquable, mais elle ne suffit pas à établir la réalité d'une décomposition chimique. Cet iodure noirci n'est pas de l'argent pur, réduit à l'état de poudre impalpable.

» Étudions avec plus de soin sa nature intime. Quand on met, dans un jour d'été, une plaque d'argent iodée dans la chambre obscure, pour l'y laisser pendant vingt-quatre heures, on obtient après ce



temps, comme je l'ai déjà indiqué, une image positive, laquelle est la dernière des deux qui se sont formées sur la plaque, car la première était négative. Cependant l'image positive n'a que des nuances grises, et je n'ai jamais aperçu de couleurs quand elle était produite de la sorte. Maintenant on demandera si cette deuxième image doit être la dernière, ou bien s'il peut encore se former une troisième image négative, puis une quatrième positive, etc., dans le cas où l'on a donné à l'action de la lumière le temps voulu.

» Pour résoudre cette question, on a iodé deux plaques *d'argent*, exposé de plus l'une aux vapeurs du chlorure d'iode, et mis chacune d'elles séparément dans une chambre obscure. Le temps était très-défavorable : c'était pendant l'hiver, et le soleil restait presque toujours caché ; chacune de ces chambres obscures était placée dans un appartement sombre, pour éviter toute lumière latérale, et dirigée vers des maisons éloignées. Treize jours après, je sortis les plaques : chacune offrait une image positive, et une de ces plaques, celle qui fut précédemment exposée au chlorure d'iode, présenta le plus beau phénomène que j'aie encore vu dans ce genre : les parties claires étaient du bleu de ciel le plus vif, les parties sombres avaient pris une couleur de feu non moins animée. Je ne doute nullement que ce ne fût toujours la deuxième image ; car, avec une lumière si faible, une quatrième image n'était pas attendue, même en admettant qu'il puisse s'en former en général. Cette expérience nous fait faire un pas de plus : elle démontre que l'iodure d'argent *noirci* était redevenu de l'iodure d'argent coloré, et cela seulement par l'effet continué de la lumière. Voici une seconde preuve que cet iodure d'argent coloré était redevenu semblable au premier. D'après la découverte de M. Herschel, l'iodure d'argent primitif non attaqué par la lumière peut facilement se dissoudre dans l'hyposulfite de soude, ce qui n'a pas lieu pour l'iodure d'argent *noirci*. Ayant donc mis la plaque d'argent déjà mentionnée dans une dissolution de ce sel, la couche colorée disparut promptement, et il ne resta que la première image négative ; ce qui prouve que l'iodure d'argent noir est ramené à son premier état par l'influence continuée de la lumière, et que cette matière noircie est vraisemblablement très-peu différente de l'iodure d'argent coloré ordinaire.

» Il me fut impossible de continuer de la sorte ces expériences, qui

occupent trop longtemps les appareils. J'y renonçai avec d'autant moins de peine que je n'étais pas sûr de réussir, après une expérience d'un mois, à déterminer quelle espèce d'image s'était formée sur la plaque. Pour atteindre ce but plus commodément, j'exposai au jour et le plus possible à l'action du soleil une plaque d'argent iodée : cette plaque devint d'abord noire, puis, comme on l'a déjà indiqué, elle redevint claire avec une teinte verdâtre. Environ quinze jours après, elle reparut encore sombre ; puis, après un temps plus considérable, elle redevint plus claire. Ces changements alternatifs se reproduisirent au moins cinq ou six fois. Pour les bien distinguer, j'avais de temps à autre placé sur la plaque des bandes de papier de couleurs foncées, afin d'éviter que les parties que je couvrais fussent atteintes par la lumière. De même aussi, j'avais soin d'observer toujours ces plaques dans la même position par rapport à la lumière réfléchie ; car sans cette précaution les parties claires et les parties sombres se seraient trouvées interverties, ce qu'il est facile de remarquer même sur de bonnes images de M. Daguerre. Le résultat de ces épreuves est tout-à-fait concluant à lui seul ; d'autres faits lui donnent plus de certitude encore.

» L'opinion que la lumière ne met pas d'iode en liberté sur la plaque d'argent iodée est confirmée d'une manière décisive par une expérience de M. Draper. M. Draper a trempé du papier dans une dissolution d'amidon et l'a appliquée sur la plaque d'argent iodée : quand la lumière du soleil pénétrait ce papier, l'iodure d'argent devenait vert foncé, sans que sur le papier on trouvât aucune trace de coloration bleuâtre. D'après ce qui précède, je tiens pour prouvé, ou du moins pour très-probable, *qu'aucune décomposition de l'iodure d'argent n'a lieu par l'influence de la lumière,* et je renvoie pour de plus amples détails aux diverses classes de phénomènes dont j'aurai à parler dans la suite.

» Maintenant j'aborde la troisième assertion, d'après laquelle l'action la plus prolongée de la lumière attaque seulement la surface extérieure de l'iodure d'argent, quoique la couche entière soit ordinairement d'une excessive ténuité. Une plaque d'argent iodée, de couleur jaune, fut exposée pendant deux mois au jour et le plus possible aux rayons directs du soleil. On la frotta ensuite avec du coton sec, on l'exposa de nouveau au soleil, et l'on y projeta l'ombre



d'un corps rapproché. Peu de temps après, tout le reste de la plaque était devenu entièrement sombre, l'ombre seule était claire. La plaque fut frottée et exposée derechef au soleil, qui toujours produisit le même effet. De cette manière et à de longs intervalles, je renouvelai ce procédé *huit fois;* même à présent que bien des mois se sont écoulés, l'expérience n'est pas encore terminée : après chaque frottement on voit qu'il reste toujours également répandu sur la plaque de l'iodure d'argent sensible à la lumière.

» Ce résultat paraîtra remarquable, si l'on se souvient combien est mince la couche primitive d'iodure. M. Dumas fixe l'épaisseur de cette couche à moins d'un millionième de millimètre; et, dans tous les cas, cette épaisseur doit être extrêmement petite, car, malgré les nombreuses manipulations qu'exige la production d'une image daguerrienne, j'en ai fait naître jusqu'à trente, l'une après l'autre, sur du cuivre plaqué ordinaire. Sans doute qu'après cela on distinguait quelques traces de cuivre, mais ce n'étaient que des points rouges isolés, tandis que le reste de la plaque était encore intact.

» Il me reste à résoudre des objections d'un autre genre que l'on pourrait opposer à la manière dont j'envisage l'action que subit la rétine.

» On pourra d'abord essayer de comparer les perceptions de l'œil à celles de l'oreille, on voudra que des oscillations en soient de part et d'autre la condition extérieure. Mais, outre que dans un cas il est question du mouvement vibratoire de molécules pondérables, au lieu que dans l'autre il s'agit de molécules impondérables, il est de fait qu'il existe peu d'analogie entre les perceptions de l'œil et celles de l'oreille. On ne peut assimiler les différentes couleurs aux sons plus ou moins graves et aigus; les couleurs produisent pour ainsi dire une impression complète qui ne permet pas de les confondre les unes avec les autres, tandis que les différents sons ne produisent rien de semblable; l'acuité et la gravité d'un son rappellent tout au plus les diverses intensités d'une même couleur; la diversité des couleurs serait une sorte de timbre.

» On peut concevoir à la rigueur que l'oreille apprécie des différences assez petites entre des nombres de vibrations qui s'élèvent à quelques milliers seulement; mais comment supposer que l'œil puisse percevoir de légères différences entre des nombres composés de con-

taines de billions ? Les perceptions de ces deux organes, quoique un peu semblables dans leurs conditions extérieures, sont en réalité de nature toute différente.

» Ne pourrait-on pas formuler comme il suit une objection plus grave ? Les rayons violets, bleus, orangés, rouges, paraissent exercer sur l'iodure jaune d'argent une seule et même influence ; ils le mettent en état de condenser les vapeurs de mercure. Toutes les matières sensibles à la lumière connues jusqu'à présent éprouvent des modifications identiques par l'action des rayons diversement colorés : comment la rétine seule serait-elle dissemblablement impressionnée, ou comment, si l'on admet une seule et même impression, pouvons-nous distinguer les couleurs les unes des autres ? Je répondrai que l'on argue à tort de la connaissance, beaucoup trop imparfaite, que nous avons des effets de la lumière sur l'iodure d'argent : bientôt peut-être des moyens nouveaux indiqueront une différence dans l'effet produit, selon qu'il l'aura été par telle ou telle couleur. Le gaïac est coloré en bleu par les rayons violets, en bleu vert par les rayons bleus. Seebeck a vu le chlorure d'argent coloré différemment dans les différentes couleurs du spectre ; et, en général, tout observateur qui a longtemps étudié l'action de la lumière sur une matière quelconque, a dû être étonné du grand nombre de nuances qui se sont présentées à lui selon les circonstances. Ces nuances indiquent autant de modifications que peut subir la matière sous l'influence de la lumière ; la supposition que les couleurs agissent également n'est plus soutenable. Il sera toujours difficile de faire là-dessus des expériences, parce qu'on ne sait pas bien opérer avec des rayons simples ; mais, dans tous les cas, on doit être d'accord que les couleurs différentes produisent des résultats différents. Il est cependant un cas dans lequel toutes les couleurs, y compris le jaune et le vert, agissent de la même manière sur l'iodure d'argent : c'est lorsque leur action s'est longtemps prolongée ; alors elles amènent l'iodure à condenser les vapeurs de mercure, et le noircissent, si leur influence continue. Or, s'il existe une preuve concluante de la justesse de mon opinion sur le procédé de la vision, elle consiste assurément en ce que la même chose a lieu dans l'œil, pour lequel toute diversité de couleur disparaît par une action continuée, de telle sorte qu'il ne reste plus qu'une impression générale de lumière, comme on peut s'en assurer en fixant

sans interruption un objet vivement coloré. Une expérience de M. Brewster est plus décisive encore. Si l'on regarde fixement et longtemps, à travers un prisme, le spectre résultant de la flamme d'une bougie, on voit disparaître premièrement le rouge, le vert et une partie du bleu; si l'on continue à regarder sans remuer l'œil, on voit disparaître ensuite le jaune, qui se change en bleu, de manière qu'au lieu d'avoir toutes les couleurs prismatiques, on n'aperçoit plus qu'une image de la flamme, allongée et uniformément blanche. Pour faire réussir cette curieuse expérience, il suffit de soulever avec la main la paupière supérieure pour l'empêcher de s'abaisser. A-t-on, après une demi-minute de temps, obtenu l'image blanche, et laisse-t-on retomber la paupière, en recouvrant l'œil tout de suite, on voit paraître un moment le spectre avec sa couleur, mais il cède rapidement la place à l'image blanche, etc. Voici donc un seul et même effet de toutes les couleurs du spectre; c'est exactement ce qui se présente sur la plaque d'argent iodée.

» L'expérience de M. Brewster confirme si bien notre opinion, qu'il faut se demander comment on expliquera ce fait, d'après la manière de voir reçue jusqu'ici sur l'acte de la vision. Sans doute on parlera de couleurs complémentaires : on dira qu'avec l'impression primitive se développe aussi, après quelque temps, celle de la couleur complémentaire, et que ces deux couleurs superposées produisent du blanc. Mais ceci mérite à peine le nom d'explication, parce qu'en considérant la nature de la couleur comme consistant en un certain nombre de vibrations de l'éther dans un temps déterminé, il est impossible d'attacher à cette assertion gratuite aucun sens précis. D'après nous, la manière dont on a envisagé les effets complémentaires dans l'œil n'est quelquefois qu'un subterfuge par lequel on essaie de rendre raison des couleurs subjectives; tandis que ces phénomènes s'expliquent facilement, dans notre opinion, sans qu'on soit obligé de recourir à aucune activité vitale particulière.

» L'opinion la plus accréditée, principalement en France, est qu'il existe des rayons chimiques particuliers, et différents par conséquent des rayons lumineux. Mes idées sur la nature de la vision ne s'accordent pas, bien entendu, avec cette assertion, pour la justification de laquelle je ne connais aucun autre fait que l'existence des rayons obscurs, nommés rayons chimiques. Je pense bien que personne n'aura

l'idée de faire valoir ici les expériences sur le passage des rayons chimiques à travers certaines substances. Il me semblait plus naturel d'analyser l'influence de la lumière polarisée sur des matières sensibles, pour voir si on ne découvrirait pas quelque phénomène entraînant la distinction entre les rayons chimiques et les rayons lumineux. Quant à moi, dans toutes mes expériences, variées à l'infini, je n'ai observé aucun phénomène de cette nature; et si l'on tient à l'existence des rayons chimiques spéciaux, il faut du moins ajouter qu'ils sont tout-à-fait soumis aux mêmes lois que les rayons lumineux, en ce qui regarde les interférences et la polarisation.

» J'ai réussi à obtenir, à travers le spath calcaire, des images très-complètes, et tout-à-fait semblables à celles de M. Daguerre. Mon procédé pour y parvenir était celui-ci : je fixais immédiatement devant la lentille à court foyer de la chambre obscure un prisme achromatique de spath calcaire, placé de manière à faire paraître à la fois deux images de l'objet, d'une statue, par exemple, qui est l'objet le plus convenable.

» Des deux images ainsi obtenues, une seule est sans couleur, et c'est l'image ordinaire; l'autre présente un contour coloré, qui cependant ne nuit pas à sa netteté. Je suis parvenu aussi à fixer sur la plaque daguerrienne l'image du système des anneaux colorés que la lumière polarisée détermine en traversant le spath calcaire. Cette image était très-délicate et très-pure. Pour l'obtenir, je fixai un cristal de spath calcaire aux deux faces planes, parallèles entre elles, et perpendiculaires à l'axe, entre deux prismes de Nicol, immédiatement devant la lentille de la chambre obscure, et je dirigeai le tout vers un ciel pur. Je reproduisis aussi sur la plaque d'argent les figures formées sur des verres trempés, en ayant soin de placer quelquefois entre le verre et la lentille un prisme de spath calcaire, pour obtenir à la fois les deux figures complémentaires. Ces expériences et d'autres semblables réussissaient complétement, ce qui démontre bien positivement que si les images daguerriennes sont dues à des rayons chimiques, ces rayons se polarisent comme les rayons lumineux. Ainsi, la croix noire sur l'image d'un cube trempé prouve que les rayons chimiques sont, dans les mêmes circonstances, aussi peu réfléchis que les rayons lumineux par les miroirs croisés de l'appareil de polarisation.

» Ceux qui voudraient répéter ces expériences seront peut-être bien aises de trouver indiqué ici le temps qu'elles ont demandé. La distance locale de la lentille de la chambre obscure était de 99 millimètres et son ouverture de 15 millimètres. Par le moyen d'un prisme de spath calcaire, on a obtenu la double image en moins d'une minute, en se servant du chlorure d'iode, et prenant pour objet un buste blanc exposé au soleil. Le système des anneaux colorés se dessina, sur une plaque simplement iodée, sans chlorure, et par une journée sombre, en deux heures et demie. Les images des verres trempés exigèrent à peu près le même temps. On voit donc que le peu d'intensité de la lumière fait que cette expérience exige quelquefois des heures entières, quand on n'emploie pas le chlorure d'iode. Il est d'ailleurs absolument nécessaire d'opérer dans un appartement sombre, où aucun rayon de lumière latérale ne puisse pénétrer.

» Si, de tout ce qui vient d'être dit, il résulte que les rayons chimiques ne diffèrent pas des rayons lumineux, sous le rapport de la réflexion, de la réfraction, de l'interférence et de la polarisation, alors l'opinion qui admet l'existence des rayons chimiques spéciaux ne saurait guère être justifiée.

» On peut cependant envisager la question sous un autre point de vue, qui établirait entre les rayons chimiques et lumineux une différence, non plus essentielle, mais accidentelle. On a déjà énoncé par d'autres motifs l'idée que les corps lumineux doivent être regardés comme émettant des rayons bien différents quant aux vitesses de translation et d'oscillation. Le fait que la lumière des étoiles vers lesquelles la terre s'avance donne le même indice de réfraction que celle des étoiles dont la terre s'éloigne, a depuis longtemps conduit M. Arago à émettre cette manière de voir. Il faudrait donc dire que, parmi les rayons émis par un corps lumineux, un certain système seulement agit sur telle matière sensible, et un autre système sur telle autre; et, au nombre de ces matières sensibles, il faudrait compter la rétine. Il existerait un système de rayons qui seuls agiraient sur elle et y produiraient l'impression de la couleur. Ce système, cependant, n'a pas plus d'étendue que ceux qui agissent sur d'autres matières; car il existe, ainsi que nous l'avons déjà dit, un iodure d'argent qui est affecté par toutes les couleurs, aussi bien que

la rétine. S'il en est ainsi, on ne peut nier la possibilité des rayons chimiques : ce seraient alors des rayons qui n'agissent pas sur la rétine, mais bien sur d'autres matières sensibles. A cela on ne peut rien objecter *à priori*. M. *Ritter* a trouvé, comme on sait, des rayons obscurs en observant dans l'action de la lumière sur le chlorure d'argent un noircissement qui s'étendait même au-delà du violet du spectre; cette découverte a été confirmée par MM. *Wollaston*, *Seebeck* et d'autres. Moi-même j'ai examiné cette espèce de rayons dans la chambre obscure, sans être parvenu cependant à acquérir là-dessus aucune certitude. Il n'est pas facile de déterminer les limites du violet ; ces limites varient certainement avec les circonstances, non-seulement pour des yeux différents, mais encore pour un même œil. Ajoutez à cela qu'on est obligé de remuer le papier, si l'on opère sans l'aide de l'*héliostat*, ce qui contribue à rendre les résultats beaucoup moins dignes de confiance. Suivant Herschel, il est très-possible que plusieurs animaux, par exemple des insectes, n'aient la sensation d'aucune des couleurs que nous percevons, et que leurs impressions résultent d'une sorte de vibration, dont nous ne pouvons nous faire une juste idée. M. Wollaston étend cette opinion même à l'ouïe des animaux.

» J'aborde maintenant l'intéressante question de l'impressionnabilité de la rétine, comparée à celle des autres matières sensibles connues jusqu'ici. Nous aurons à examiner tour à tour : 1° le degré de cette sensibilité ; 2° sa mutabilité : je dis sa mutabilité, car on ne peut nier que l'œil possède la faculté d'adapter sa sensibilité à l'intensité de la lumière, et de la rétablir après qu'elle a été exaltée ou diminuée. Je montrerai, d'ailleurs, que sous aucun de ces deux rapports la rétine ne se comporte, en quoi que ce soit, d'une manière bien différente des autres substances soumises à l'action de la lumière.

» Et d'abord, l'impressionnabilité de la rétine est sans doute très-grande ; mais qu'on ne la considère pas comme démesurément plus grande que celle des composés d'argent. La sensibilité de l'iodure d'argent s'accroît d'une manière extraordinaire quand il est soumis aux vapeurs de chlorure d'iode ; mes expériences semblent réduire le temps à un dixième de celui qui est ordinairement nécessaire. M. Gaudin a démontré que les vapeurs du brômure d'iode agissent

d'une manière encore plus favorable, il dit avoir obtenu des images dans un temps qu'il évalue à un dixième de seconde. L'action des verres rouges prouve que longtemps avant que l'on sorte les plaques de la chambre obscure, l'image s'y trouve déjà avec tous ses détails et nuances, et on trouvera sans doute encore d'autres moyens de démontrer l'existence de ces images à des époques bien antérieures.

» Le temps pendant lequel les plaques d'argent doivent rester dans la chambre obscure correspond à celui dont la rétine a besoin pour arriver à cet état normal où les couleurs ne se distinguent plus ; or, ces deux durées sont commensurables l'une et l'autre. Les couleurs du spectre disparaissent ordinairement dans un intervalle de trente à soixante secondes : or, l'on a reproduit complétement en deux minutes de temps l'image d'une flamme de chandelle ; M. Draper a obtenu celle de la flamme d'un bec à gaz d'Argant en quinze secondes seulement, et cela sans l'emploi du chlorure d'iode. Sans doute que ces temps seront plus considérables quand l'intensité de la lumière sera faible ; mais alors aucune comparaison n'est possible avec la rétine, parce qu'on ne peut l'amener à l'état anormal en question en lui présentant des couleurs peu intenses.

» Pour ce qui a rapport à la vision ordinaire et normale, on admet généralement que cette vision ne s'opère pas non plus instantanément, mais après un certain laps de temps. M. Fechner affirme que l'impression produite sur la rétine n'atteint son maximum qu'après un temps fini. Il est arrivé à cette conclusion en observant qu'un point noir sur un disque blanc ou un point blanc sur un disque noir produisent, donnent, quand les disques tournent rapidement, le premier la sensation d'un cercle noir, le second la sensation d'un cercle blanc. Il semble, du reste, que la rétine ressemble encore, sous un autre rapport, aux papiers sensibles, qui sont d'abord promptement affectés, plus promptement même que l'iodure d'argent, mais qui exigent un laps de temps assez long avant de se montrer sensibles aux effets ultérieurs dont j'ai déjà parlé.

» Quant à ce qui concerne les variations dans l'impressionnabilité de l'œil, le vif éclat d'une forte lumière l'éblouit d'abord : ce n'est qu'après un temps plus ou moins long qu'il peut voir par une lumière aussi éclatante. Il n'arrive de même qu'après un certain intervalle

au maximum de sensibilité qui lui permet de voir avec une lumière très-peu intense. J'ai déjà dit que la continuation de la vision transforme la sensation des couleurs du spectre en la sensation d'une lumière blanche uniforme ; j'ai ajouté qu'un simple abaissement de la paupière hâtait cette transformation. La pression exercée sur l'œil modifie aussi considérablement sa sensibilité. La simple pression du doigt produit la sensation de la lumière ; la sensation d'un cercle de feu quand elle est très-forte, la sensation des diverses couleurs quand elle est plus ou moins faible. Cette influence de la pression est restée jusqu'ici sans explication satisfaisante ; on en est encore à se demander pourquoi l'on n'observe rien de semblable pour les sens du goût et de l'odorat. Il est vrai qu'il se passe quelque chose d'analogue pour le sens de l'ouïe, quoique les nerfs acoustiques soient beaucoup plus difficiles à atteindre ; mais la sensibilité de la membrane du tympan est d'une nature tout-à-fait différente de celle de la rétine, et peut s'expliquer autrement.

» Quand l'œil s'adapte à une certaine intensité de lumière, la pupille concourt sans aucun doute à l'effet produit, mais elle n'y concourt que dans un très-faible degré ; les variations de son ouverture sont beaucoup trop petites pour pouvoir régler les variations souvent énormes de la lumière extérieure. D'ailleurs la pupille se dilate ou se contracte alors même que l'intensité de la lumière ne varie pas. En mesurant le diamètre de la pupille, Olbers trouva qu'il variait dans le rapport de 1 à 1,86 dans des circonstances où la lumière émise par l'objet avait conservé la même intensité.

» Il faut donc expliquer autrement que par les contractions et dilatations successives de la pupille les variations de sensibilité de la rétine. Pour arriver à cette explication, j'ai examiné avec le plus grand soin les effets de la lumière sur les substances sensibles à son action. Cet examen m'a conduit à des découvertes du plus grand intérêt, et que je vais exposer, en racontant les faits dans leur ordre chronologique.

» On savait avant moi : 1° que si l'on écrit sur une plaque de verre avec certaines substances, puis qu'on efface les caractères formés, il suffira, pour les faire reparaître, de couvrir la plaque de son haleine ; 2° que si après avoir mis une pièce de monnaie sur une plaque de verre, on souffle dessus, puis qu'on retire la plaque, on ne voit bien-

tôt plus rien, mais qu'une nouvelle insufflation fait reparaître le contour de la pièce.

» Ces énoncés sont beaucoup trop limités ; la substance avec laquelle on écrit sur le verre peut être quelconque ; à la plaque de verre, on peut substituer une surface polie de métal, de résine, de bois, de carton, de cuir ; la surface liquide du mercure, du verre même dépoli.

» On ne peut guère douter que, dans ces expériences, la surface ne subisse des modifications réelles, et j'étais disposé à croire que ces modifications avaient pour cause des variations de température : j'ai été d'abord confirmé dans cette opinion par les expériences suivantes. Je fis chauffer une plaque de métal gravé ; je la plaçai pendant une demi-minute à peu près sur une glace très-nette ou sur une plaque d'argent, et la retirai : l'insufflation mit en évidence une image bien plus parfaite ; on distinguait non-seulement le contour, mais chaque lettre, chaque trait. Un corps froid imprima de la même manière son image sur une plaque dont j'avais élevé la température. Les phénomènes produits restaient d'ailleurs les mêmes, quel que fût le corps déposé sur la plaque. Je songeai alors à remplacer l'haleine, chargée de vapeurs humides, par d'autres vapeurs de mercure, d'iode, de chlore, de chlorure d'iode, etc. La condensation de ces diverses vapeurs donna naissance, même dans l'obscurité, loin du contact de la lumière, à des images complètes des objets chauffés ou refroidis.

» La découverte de M. Daguerre, qui consiste principalement dans ce fait, que, par l'action de la lumière, l'iodure d'argent est mis dans un état tel qu'il condense les vapeurs de mercure, n'est donc plus un fait isolé ; ce n'est qu'un cas particulier d'une loi générale de la nature. Quand une surface polie ou nette est mise en contact avec un corps d'une température différente, certaines parties de cette surface acquièrent aussi la faculté de condenser toutes sortes de vapeurs et de les fixer par adhésion. Cette faculté de condensation subsiste alors même qu'une vapeur s'est combinée avec la plaque comme l'iode avec l'argent ou le cuivre. Ainsi la plaque d'argent qui a été mise en contact avec le corps chaud ou froid, puis exposée aux vapeurs de l'iode, du chlorure, ou du brômure d'iode, reproduit l'image de ce corps sous l'action de la lumière ou des vapeurs de mercure.

» J'avais cru d'abord que la formation des images dans les circonstances que je viens d'indiquer était due à une différence de température; cette opinion n'était pas fondée. Pour la renverser, il aurait suffi de considérer une seule des images obtenues, de remarquer que les traits les plus déliés se reproduisaient, quoiqu'ils fussent sensiblement à la même température et que la plaque sur laquelle leur image se dessinait fût un très-bon conducteur du calorique. Pour rendre le doute même impossible, je cherchai si je ne pourrais pas obtenir des images sans l'intervention de la chaleur. Je laissai longtemps dans une chambre fermée les corps et les plaques sur lesquels l'on voulait agir; après les avoir mis en contact, j'exposai les plaques à l'action des différentes vapeurs; j'obtins ainsi des images très nettes et très délicates. La proposition énoncée est donc encore trop restreinte, et il faut dire que *toute surface touchée par un corps quelconque acquiert la faculté de reproduire l'image de ce corps par la condensation d'une vapeur quelconque, avec adhésion ou combinaison chimique*. Je me borne ici au mot général *condensation*, qui pourrait n'être pas assez exact, me proposant d'expliquer plus tard la manière merveilleuse dont les vapeurs se comportent dans la représentation de l'objet.

» Si déjà les essais qui précèdent prouvent qu'on peut imiter les effets de la lumière par le contact, les expériences suivantes le démontreront bien plus clairement encore. Sur une plaque d'argent recouverte d'iode, au sein des ténèbres de la nuit, je plaçai une petite plaque d'agate taillée en creux, une plaque de métal gravée, une bague d'écaille; quand ensuite j'exposai la plaque aux vapeurs du mercure, je vis apparaître une bonne et distincte image des figures de l'agate, des caractères de la plaque, de la bague, etc. Une seconde plaque iodée et mise en contact dans les ténèbres avec les mêmes objets, fut exposée aux rayons directs du soleil, ou à la lumière diffuse : les images apparurent encore; d'autres plaques, enfin, préparées de la même manière, furent présentées à l'action de la lumière à travers des verres colorés, jaunes, rouges, violets : sous les verres jaunes et rouges, on obtint à peine des traits obscurs, tandis que sous le verre violet les images étaient très-distinctes.

» Je vais prouver maintenant que la plaque iodée n'est nullement nécessaire; que ces mêmes phénomènes se reproduisent avec des

plaques de métal pur, et même avec des substances difficilement altérables, le verre, par exemple.

» Une plaque d'argent, qui n'avait pas encore servi, fut nettoyée et polie avec le plus grand soin : au-dessus de cette plaque, à une très-petite distance, on suspendit une petite surface noire présentant divers caractères découpés, et tout l'appareil fut exposé aux rayons solaires, dont on lui faisait suivre la marche. La plaque refroidie ne montrait rien encore; mais dès qu'elle eut été exposée aux vapeurs du mercure chauffé à 75 degrés centigr., il se forma, à ma grande satisfaction, une image distincte de l'écran. Sur tous les points où la lumière du soleil avait exercé son influence, il s'était précipité beaucoup de mercure. Je répétai souvent cette expérience, et elle réussit toujours. Quelquefois les plaques, après avoir été soustraites à l'action du mercure, étaient exposées aux vapeurs de l'iode et ensuite aux rayons du soleil; les images étaient alors plus belles. J'employai plus tard une plaque de cuivre, par un temps très-défavorable; l'image produite par la vapeur du mercure, faible d'abord et peu distincte, devint très-intense quand la plaque eut été exposée aux vapeurs d'iode.

» J'expérimentai enfin par le même procédé sur une plaque de verre de glace très-pur; chaque insufflation mettait en évidence une image aussi nette que sur la plaque d'argent, et cette image reparut à volonté pendant un temps très-long.

» On se trouve amené par là à cette conclusion très-vaste : *La lumière agit sur toutes les substances, et l'on peut mettre son action en évidence à l'aide d'une vapeur quelconque qui adhère à la substance ou exerce sur elle une action chimique.* La découverte de Daguerre est un cas très-particulier de cette proposition générale.

» Il me paraissait important d'essayer, au moins dans un cas particulier, quelle était sur les substances simples l'action des rayons diversement colorés. J'ai trouvé que les rayons violets exercent seuls une influence sur les plaques d'argent pur. Les rayons rouges, quoique plus lumineux et plus chauds, donnaient à peine les premiers linéaments d'une image.

» Il me reste à décrire maintenant de quelle manière les diverses vapeurs se condensent sur les plaques. Dans mes premiers essais, par simple insufflation, j'avais cherché à reconnaître si les parties de

l'image qui n'avaient pas été en contact avec l'objet, celles, par exemple, qui correspondent aux creux d'une pierre gravée, paraissaient plus brillantes ou plus sombres. Si elles avaient paru constamment plus sombres, j'en aurais conclu que la vapeur se déposait sur les parties touchées; c'eût été le contraire dans le cas où elles auraient paru brillantes, la vapeur se serait condensée sur les parties non parvenues au contact. Mais les phénomènes furent plus compliqués, plus irréguliers que je ne le pensais. Par l'haleine, j'obtins dans les mêmes circonstances des images, tantôt sombres, tantôt claires, en partie sombres et claires à la fois. Par une insufflation prolongée, une image, d'abord blanche, devint sombre peu après, pour redevenir encore brillante. Avec l'emploi du mercure, les apparences ne furent pas moins complexes. Les vapeurs mercurielles se déposaient de préférence quelquefois sur les endroits non touchés, quelquefois sur les endroits touchés; assez souvent on les faisait disparaître en essuyant, d'autres fois elles résistaient au frottement. Je me trouvai dans le même embarras avec l'iode : les portions de la plaque d'argent mises en contact avec l'objet étaient tantôt plus claires, tantôt plus sombres que les portions non touchées : l'exposition à la lumière faisait noircir tantôt les unes, tantôt les autres.

» Les caractères d'un cachet, d'abord noirs, avaient un entourage plus éclairé; au bout de quelques instants, les caractères brillèrent et l'entourage s'assombrit, puis l'entourage reprit son éclat. Ces successions de clair et de sombre auraient trouvé leur explication naturelle dans ce que j'ai déjà dit plus haut de l'action alternative de la lumière sur l'iodure d'argent, si le creux d'une pierre gravée, qui se trouvait sur la plaque en même temps que le cachet, avait donné les mêmes résultats que ces caractères; mais l'identité n'eut pas lieu. L'image des creux de la pierre fut d'abord plus brillante que le contour; elle devint ensuite plus sombre, et ne changea plus. Je fus d'abord effrayé de cette complication; mais de plus longues recherches, en me révélant des faits plus extraordinaires encore, me mirent enfin en état de tout expliquer.

» Je m'arrêtai aux vapeurs de mercure comme au meilleur moyen d'investigation; les images qu'elles produisent sont très-nettes, très-délicates, très-fixes; on peut d'ailleurs faire agir la vapeur de mercure à des tensions très-différentes. Il m'a semblé qu'il suffisait d'o-

pérer sur les images daguerriennes ordinaires, qui offrent les mêmes nuances de clair et de sombre que les images obtenues au contact. J'ai trouvé aussi qu'il était inutile d'avoir égard à l'inclinaison de la plaque dans la boîte à mercure, et qu'on pouvait, à l'aide du mercure froid et des vapeurs à une très-basse pression, obtenir les mêmes effets qu'avec le mercure chauffé et des vapeurs à une plus forte tension. Le temps seul nécessaire à la formation de l'image variait dans les diverses circonstances. J'ai même vu naître, après une exposition de quelques heures au mercure froid, des images que les vapeurs de mercure chauffé n'avaient pas pu mettre en évidence.

» Cela posé, qu'on place dans l'appareil à mercure une plaque iodée qui soit restée le temps convenable dans la chambre noire : vers 85° on obtiendra l'image ordinaire, laquelle, comme l'on sait, disparaît par le moindre frottement. Si l'on continue à chauffer, on trouvera vers 125° que cette image fugace est fixée, qu'elle résiste à un frottement exercé à sec. J'ai obtenu de ces images fixes très-belles et d'une délicatesse incomparable dans les détails, en ne chauffant le mercure que jusqu'à 75°, et exposant ensuite la plaque au-dessus du mercure froid. Ces images conviennent éminemment pour les essais de gravure. Il n'est pas nécessaire de faire disparaître l'iode à l'aide de l'hyposulfite de soude, il suffit d'essuyer la plaque.

On pourrait croire que, dans les images ainsi fixées, le mercure n'est pas seulement adhérent, mais qu'il est combiné ; il n'en est rien. Si l'on élève encore la température, la plaque devient jaunâtre, et vers 150°, l'image, de positive qu'elle était, devient négative, en ce sens que les parties claires deviennent obscures, et réciproquement. En chauffant encore davantage, cette image négative se fixe, et, en la frottant, on se convaincra que le mercure a disparu de tous les points sur lesquels il était condensé auparavant, tandis qu'il adhère maintenant à tous les points sur lesquels il ne s'était pas précipité. Ces images négatives, une fois fixées, sont très-difficiles à effacer ; on y parvient à peine avec des liquides actifs ou des poudres mordantes.

» Ce que nous venons de dire sur les images obtenues à l'aide des vapeurs de mercure, ces alternatives remarquables, jettent un grand jour sur la question plus étendue de la condensation des vapeurs quelconques ; ce sont, en effet, partout les mêmes phénomènes.

Qu'on mette sur une plaque polie un écran où l'on a découpé divers caractères, qu'on promène dessus son haleine, et qu'on retire ensuite l'écran ; si, après avoir laissé disparaître les premières vapeurs, on souffle de nouveau, on verra que tous les points atteints d'abord par l'haleine, c'est-à-dire les caractères, paraîtront noirs ; une insufflation plus longue, plus forte, les fera briller de nouveau ; au-delà de ce terme, l'image se trouble, on ne voit plus que quelques traits. L'haleine, ou plus généralement *la condensation des vapeurs, dans cette expérience comme dans toutes les expériences semblables, agit absolument comme la lumière*. Cette conclusion ressortira encore des considérations suivantes.

» On a souvent prétendu que dans les images daguerriennes, les proportions de lumière et d'ombre étaient ce qu'elles sont dans la nature, c'est une erreur ; il n'est pas nécessaire, pour s'en convaincre, d'avoir vu beaucoup d'épreuves. Voici le véritable état des choses : si on laisse une plaque d'argent iodée trop peu de temps dans la chambre obscure, les vapeurs du mercure ne produisent aucune image, la plaque se couvre seulement d'une très-légère couche de mercure, comme cela a lieu d'ailleurs pour la plaque d'argent pur et pour l'iodure d'argent noirci. Si on laisse la plaque plus longtemps dans la chambre noire, on obtient une image, mais où se reproduisent seulement les parties les plus claires ; et, ce qui, dans ce cas, est très-essentiel, ces portions paraissent blanches, c'est-à-dire qu'il s'y est condensé beaucoup de vapeurs de mercure. En laissant plus longemps encore la plaque en présence de l'objet, on obtient une image avec beaucoup plus de détails ; mais les portions claires ont perdu en blancheur, elles paraissent grises, c'est-à-dire qu'elles ne condensent plus autant de vapeurs de mercure. Enfin, la plaque laissée plus de temps encore dans la chambre obscure ne laisse voir, quand on la retire, aucune image, et si on l'expose aux vapeurs de mercure, il se forme une image négative, c'est-à-dire que les portions les plus claires ne condensent plus du tout les vapeurs de mercure. Après tous ces détails, que pourraient encore signifier ces mots : *proportions exactes de lumière et d'ombre ?* On a seulement le droit de conclure que lorsque la lumière agit sur l'iodure d'argent, elle lui communique progressivement la propriété de condenser la vapeur de mercure, de telle sorte que si, l'action se continue au delà

d'une certaine limite de temps, elle enlève à l'iodure cette propriété, avant même d'avoir altéré sa couleur jaune. La lumière agit donc absolument comme le faisait la vapeur de mercure dans l'expérience précitée. Cette identité d'action est si remarquable, que je crois devoir l'appuyer de nouvelles preuves.

» Qu'on laisse dans la chambre obscure une plaque d'argent iodée à peu près le temps nécessaire à la formation de l'image daguerrienne, puis, qu'on l'expose sous un verre jaune aux rayons solaires, on obobtiendra, ainsi que nous l'avons déjà dit, une première *image négative*, qui disparaît pour faire place à une image positive. Or si, au moment où l'image négative a disparu, on expose la plaque à l'action des vapeurs de mercure, on aura la même image positive qui eût été produite par l'action prolongée de la lumière : impossible de trouver quelque différence entre ces deux images. Il y a donc encore identité d'action. Mais voici une comparaison plus concluante encore : jamais, que je sache, on n'a produit l'iodure d'argent noirci autrement qu'à l'aide de la lumière ; on ne l'obtient même pas à l'aide de la chaleur, car si on chauffe une plaque d'argent iodée, elle prend, par le refroidissement, une couleur blanc de lait qui, à la lumière, se change en gris clair. Or si, après que les vapeurs de mercure se sont fixées aux parties claires d'une image, au ciel d'un paysage, par exemple, on continue leur action, elles quittent le ciel, et l'iodure jaune d'argent reparaît ; mais si cette action se prolonge encore, l'iodure d'argent se noircit, le ciel paraît sombre, bien qu'on ait exclu tout accès à la lumière : ainsi se forment les images négatives.

» Ce résultat singulier du noircissement de l'iodure d'argent par les vapeurs de mercure avait fixé depuis longtemps mon attention, parce qu'il venait à chaque instant troubler la marche de mes expériences. J'espérais, par exemple, pouvoir abréger le temps nécessaire à la formation de l'image dans la chambre obscure en exposant momentanément la plaque d'argent iodée aux rayons solaires ; mais autant de fois que j'essayai ce moyen, et quelle que fût ma promptitude, la plaque qui avait conservé sa couleur jaune prenait toujours, sous l'action du mercure, une teinte noirâtre. D'ailleurs, l'iodure d'argent, noirci par les vapeurs du mercure, ne s'attache pas plus à la plaque d'argent et ne se dissout pas mieux dans l'hyposulfite de soude que s'il avait été produit par la lumière.

» J'ose affirmer que cette idendité d'action de la vapeur de mercure avec la lumière s'étend à toutes les vapeurs, et qu'on la retrouvera partout où les vapeurs agiront pendant un temps suffisant sur des plaques convenablement polies, ou sur des substances convenablement préparées. Voici encore une expérience de ce genre qui m'a toujours réussi. J'ai pris une plaque bien polie, d'argent, de platine, de cuivre, d'acier, de verre noir, etc., je l'ai couverte d'un écran découpé, puis je l'ai exposée aux vapeurs du mercure. En enlevant l'écran, je trouvais toujours du mercure déposé sur les portions correspondantes aux découpures ; ces portions se trouvaient dans une condition tout-à-fait analogue à celles de la plaque d'argent iodée qui sont parvenues au point où le noircissement commence ; elles ne condensent plus le mercure. En se servant de plaques de platine, d'acier ou de verre, on démontre mieux encore la vérité de cette assertion : si, après les avoir chauffées a 90° et les avoir exposées à l'action du mercure, on essuie les vapeurs condensées à l'aide d'un frottement léger, puis, qu'on élève encore de quelques degrés leur température, pour les exposer de nouveau à l'action de la vapeur, sans écran, les images des découpures reparaîtront, mais plus sombres que le reste de la plaque, parce que le mercure qui les couvrait a réellement disparu. C'est exactement l'effet produit par la vapeur d'eau, laquelle, dans une seconde insufflation, semble éviter les portions qu'elle avait d'abord envahies. Je répétai l'essai précédent en exposant, pendant un temps très-court, une plaque polie, recouverte d'un écran découpé, aux vapeurs du mercure chauffé à 75° : en retirant la plaque, je n'y vis aucune image ; mais, quand je l'eus exposée une seconde fois, libre et sans écran, à l'action du mercure, les découpures apparurent moins brillantes que les autres parties de la plaque qui avaient condensé plus de vapeurs.

» Comme la lumière, toutes les vapeurs de mercure, d'eau, etc., continuent l'effet commencé et peuvent même opérer une inversion complète. De plus, les actions des vapeurs et de la lumière se remplaçant et se complétant mutuellement, on aura des images identiques, soit qu'on expose la plaque à l'influence de la lumière après l'avoir recouverte d'iode, soit qu'on l'expose aux vapeurs d'iode après lui avoir fait subir l'action de la lumière. Il y a plus encore : la vapeur d'iode agit comme la lumière même sur l'iodure d'argent déjà



formé, en le faisant passer tour à tour du jaune au rouge, du rouge au rose, du rose au bleu; et ces couleurs sont bien l'effet de l'action successive de la vapeur d'iode; car, à part quelques différences légères de ton, elles ressemblent entièrement à celles que produirait l'influence continuée de la lumière sur elles: à mesure qu'elles se montrent, on voit diminuer, pour l'iodure, sa solubilité dans l'hyposulfite de soude, pour la plaque, sa faculté de condenser la vapeur de mercure; ce qui n'aurait pas lieu si ces couleurs avaient leur cause dans l'inégale épaisseur de la couche d'iode. Du reste, il ne faut pas s'attendre à retrouver toujours le même ordre dans la succession des teintes dont nous venons de parler, car la surface de l'argent n'est pas toujours homogène, la température de tous ses points n'est pas la même, elle n'est pas toujours également attaquée par l'iode. J'ai observé trois cycles ou séries de couleurs, commençant la première par le jaune, la seconde par un jaune plus pur, la troisième par un jaune verdâtre; chaque série demande, pour se former, plus de temps que celle qui l'a précédée.

» Qu'on me permette de dire en passant que j'attribue, dans les procédés de M. Daguerre, la grande sensibilité des plaques iodées à ce fait que l'iodure s'est formé par l'action de l'iode en vapeurs sur l'argent. Produit d'une autre manière, l'iodure serait beaucoup moins impressionnable; et si, en exaltant la sensibilité de la plaque, le bromure et le chlorure d'iode diminuent considérablement le temps nécessaire à la formation des images, c'est parce qu'ils agissent aussi à l'état de vapeur. Le contact de ces vapeurs fait passer presque immédiatement du jaune au rouge, du rouge au rose, etc., une plaque qui, dans la vapeur d'iode, n'avait pris presque aucune teinte; et, chose singulière, la plaque dont la sensibilité a été exaltée par l'action des chlorures ne perd rien de cette sensibilité quand on l'expose de nouveau aux vapeurs d'iode.

» De tout ce qui précède, ne puis-je pas conclure avec assurance que ces trois causes, *le contact*, *l'action des vapeurs et la lumière*, *produisent*, *quoique à différents degrés*, *suivant les circonstances*, *les mêmes effets sur toutes les substances*, *en modifiant leur affinité pour les vapeurs*, *ou en leur donnant la faculté de les condenser ?* Je ne crois pas errer en donnant à ma proposition la plus grande généralité possible; ces mots, toutes les substances, ne sont pas une exagération.

» Une remarque bien simple, mais qui s'est présentée trop tard à mon esprit, m'a mis sur la voie d'une nouvelle cause plus universelle et qui est sans cesse en action dans la nature. En voyant les parties creuses des pierres gravées se représenter, même dans l'obscurité, sur les plaques polies, j'aurais dû affirmer immédiatement que le contact, l'action des vapeurs ou de la lumière, n'étaient pas absolument nécessaires à la production des images. Cette conséquence si simple m'échappa. Longtemps après seulement, en réfléchissant à l'ensemble de mes expériences, je vis clairement que dans une multitude de circonstances le contact n'avait pas eu lieu; l'existence d'une action à distance et sans l'intermédiaire de la lumière ou des vapeurs, me parut alors évidente, et je résolus de l'étudier.

» Sur une plaque d'agate dans laquelle on avait incisé de nombreuses figures, je déposai tout autour de petites lames de cuivre, et sur le rebord, formé par ces lames, je plaçai une plaque d'argent dont la distance à la surface de l'agate était d'environ un demi-millimètre. Quand, après quelques secondes, je retirai la plaque d'argent pour l'exposer à l'action des vapeurs du mercure, il s'y forma une image très-distincte. J'ai souvent répété depuis le même essai à des distances plus grandes et toujours avec un égal succès : il me sera permis dès lors d'énoncer cette merveilleuse proposition : *Deux corps quelconques mis en présence et suffisamment rapprochés impriment l'un sur l'autre leur image.*

» Il importe de faire observer que mes expériences ont été faites à l'abri de toute lumière pendant la nuit. Je plaçais le corps que je faisais réagir dans une chambre noire et dans une cassette fermée. De plus, alors même que la lumière extérieure eût trouvé quelques accès, on n'aurait pas pu lui attribuer aucun des effets produits, car ma manière d'expérimenter consistait à placer l'un au-dessus de l'autre à une très-petite distance, ou au contact, l'objet et la plaque sur laquelle il devait se dessiner.

» Je suis loin de penser que ces faits nouveaux forcent à admettre dans les corps une force ou une énergie nouvelle ; bien loin de là, je suis plutôt porté à en conclure que tous les corps sont des corps lumineux par eux-mêmes (1). Ce qu'il y a de certain, c'est qu'on

(1) L'opinion que M. Moser exprime dans ce passage, et qu'il développera

ne peut pas assigner pour cause à ces curieux phénomènes une lumière d'emprunt analogue à la lumière phosphorescente. Je n'ai aperçu dans les images aucune différence, soit qu'avant d'opérer j'eusse laissé l'objet longtemps dans l'obscurité, soit que je l'eusse exposé aux rayons solaires. Je couvris la moitié d'une agate gravée qui avait été longtemps soustraite à l'action de la lumière, je l'exposai aux rayons du soleil, et la plaçai découverte au-dessus d'une plaque d'argent : l'image de la seconde moitié frappée par la lumière ne différait en rien de la première, elle n'était ni plus ni moins distincte. J'explique facilement tous les faits relatifs à ces étonnantes productions d'images, en admettant, 1° que les corps ont une lumière propre; 2° que les rayons de cette lumière, lancés obliquement, ont une énergie plus faible que ceux qui sont émis dans une direction normale. On comprend aussi sans peine que l'élévation de température de l'objet aide considérablement la formation de son image; car cette élévation de température, qui, portée à de certaines limites, rendrait l'objet lumineux, doit nécessairement rendre plus active la faculté qu'il a d'émettre une lumière propre. Tous les corps ne jouissent pas au même degré de cette faculté, laquelle, toutes choses égales d'ailleurs, est plus grande quand le corps est poli.

» J'ai obtenu sur l'argent des images nettes des substances suivantes : l'argent pur, l'iodure d'argent, le laiton, le fer, l'acier, le verre violet ou rouge, la corne noire polie, le papier blanc ou couvert de caractères, le gypse, le mica, l'agate, le liége, etc. Je n'ai trouvé aucune substance qui m'ait donné un résultat négatif; de sorte que je suis en droit de conclure que tous les corps rayonnent une lumière propre; que là où pour la rétine il n'y a qu'obscurité, il peut y avoir un rayonnement exerçant une action sensible sur d'autres substances. Ce rayonnement est assez intense pour qu'on puisse obtenir de belles images en moins de dix minutes, pourvu que l'on s'aide de l'action continuatrice des vapeurs de mercure à basse tension. Cette action des vapeurs n'est nécessaire que lorsqu'on veut précipiter la formation de l'image; quand on laisse l'objet assez longtemps en présence d'une plaque iodée, il y imprime son image en noircissant

plus tard, est vraiment singulière; nous la discuterons. Il y aurait, suivant lui, une lumière latente, comme il y a un calorique latent.

l'iodure, alors même qu'on a extrait tout ce qui, pour la rétine, serait de la lumière.

» Une expérience, déjà ancienne, de M. Riess (*Annales de Poggendorff*, v. XLIII, p. 85), expérience qui renfermait une admirable découverte, et qu'on a trop peu remarquée, nous met sur les traces d'une autre source d'images. Cet ingénieux physicien observa que, lorsque la surface polie d'une substance conductrice s'était trouvée sur le passage d'une décharge électrique, ou avait été seulement touchée par une gerbe ou houppe de fluide électrique, elle offrait certaines parties qui ne jouissaient plus de la faculté de condenser les vapeurs, et qui, par conséquent, étaient modifiées comme elles auraient été par le contact, la vapeur, la lumière ou le rayonnement.

» Si maintenant je reviens à l'objet principal de ce mémoire, c'est-à-dire à l'action de la lumière sur la rétine, me sera-t-il permis de penser que j'ai fait faire un pas à la question ; que l'hypothèse émise en commençant ne paraîtra plus trop hardie? Si la lumière émise par un objet quelconque exerce une action physique sur toutes les substances, et imprime sur elles une image, comment n'en serait-il pas ainsi de la rétine? La formation de l'image dans l'œil est donc un fait très-naturel. On explique aussi facilement comment la sensibilité de la rétine peut varier, s'exalter, diminuer, revenir à son état normal, etc. N'avons-nous pas indiqué plusieurs moyens de modifier la sensibilité des plaques iodées? Ne voit-on pas cette sensibilité exaltée s'éteindre d'elle-même? M. Draper a vu des plaques sortant de la chambre obscure, et qui, pour laisser paraître l'image imprimée sur elles, n'avaient plus besoin que du contact des vapeurs, devenir insensibles à l'action du mercure, quand on les avait laissées plusieurs jours dans l'obscurité; leur sensibilité exaltée s'était éteinte comme celle de la rétine : seulement, comme le rayonnement nécessaire à la formation d'une image sur une plaque est beaucoup plus énergique que celui qui est nécessaire à la vision, on conçoit qu'il faille plus de temps pour neutraliser son effet, et qu'une fraction de seconde suffise pour ramener la rétine à son état normal, tandis qu'une plaque exige de longues heures de repos. Et d'ailleurs la rétine elle-même conserve longtemps l'image de l'objet quand il était fortement éclairé et qu'elle l'a fixée longtemps ; l'éblouissement peut durer plusieurs jours : la rétine est quelquefois même altérée, blessée d'une manière permanente.

» Ajoutons que l'impressionnabilité des plaques est modifiée par des circonstances en apparence tout-à-fait insignifiantes. Ainsi, j'ai remarqué que si, lorsqu'une plaque vient d'être polie, on attend quelques minutes avant de l'exposer aux vapeurs d'iode, l'ioduration exigera un temps beaucoup plus long, et la lumière agira bien plus lentement sur cette plaque, lors même qu'elle aurait été recouverte d'iode au même degré que toutes les autres.

» En voyant des causes si minimes exercer une action si perturbatrice sur la sensibilité de surfaces solides, on se demandera, peut-être avec étonnement, comment, par exemple, les images secondaires qui préexistent toujours dans l'œil, cet organe si délicat, ne troublent pas la vision. La pression des muscles extérieurs, dont l'effet s'étend jusqu'à la rétine, et le mouvement continuel de l'œil, qui fait varier à chaque instant la position relative des fibres du système nerveux, contribuent favorablement à empêcher que l'effet des causes perturbatrices soit assez permanent pour se faire sentir.

» Remarquons aussi que la rétine est en épanouissement des filets nerveux, et qu'il est de la nature de la substance des nerfs de revenir facilement à son état normal.

» Aux trois grandes causes de formation d'images que nous avions d'abord énumérées : le contact, l'action des vapeurs, l'influence de la lumière ; il faut donc joindre une quatrième plus universellement agissante, le rayonnement propre de tous les corps de la nature.

» Il serait important enfin d'étudier la nature intime des modifications que subissent les substances sous l'influence de ces diverses causes, et les phénomènes physiques ou chimiques qui accompagnent ces modifications. L'action de l'hyposulfite de soude nous révèle quelque chose à cet égard : il dissout facilement l'iodure d'argent aux différentes périodes de sa transformation, tandis qu'il est sans action sur l'iodure noirci. Sans être probablement décomposée, ainsi que je l'ai déjà dit, la couche d'iode a été modifiée dans ses propriétés physiques. Quatre ans après qu'elles avaient été soumises à la décharge électrique, les surfaces polies, observées par M. Riess, réagissaient sur les vapeurs. Il y a donc là évidemment des altérations profondes, analogues peut-être à la phosphorescence, mais dont la nature conserve encore le secret. »

Il faut, dans ce mémoire, distinguer nettement deux choses : les

vues théoriques, et les faits découverts. M. Moser est préoccupé de deux idées systématiques, il veut : 1° que la rétine soit impressionnée par la lumière de la même manière que les substances chimiques ; et que la vision donne la sensation non pas de vibrations, mais d'une modification matérielle ; 2° que tous les corps soient lumineux par eux-mêmes, mais que leur lumière propre soit souvent latente, et ne se fasse pas plus sentir à l'œil que la chaleur latente au thermomètre. La seconde de ces idées peut être considérée comme vraie, en ce sens, que certains mouvements vibratoires de l'éther échappent à l'œil, et se manifestent par d'autres effets que l'éclairement : elle a été victorieusement réfutée par un jeune et savant physicien M. Waidele, en ce sens, que pour expliquer les effets photographiques, découverts par M. Moser, il n'est nullement nécessaire de recourir à l'hypothèse d'une lumière invisible et de rayons latents ; mais laissons encore M. Moser exprimer mieux sa pensée.

SECOND MÉMOIRE. — *Sur l'état latent de la lumière.* — (*Annales de Poggendorf*, 57e vol. p. 1 et suiv.).

» Je me propose, dans ce qui va suivre, de démontrer qu'il y a une lumière latente, comme il y a une chaleur latente ; que cette lumière et cette chaleur se développent dans les mêmes circonstances, passent ensemble à l'état libre, et que si le mode d'agrégation des particules d'un corps vient à changer, on ne doit pas regarder ce changement comme l'effet de la seule chaleur, parce que la lumière y a pris une grande part. Je ferai volontiers au sujet de la lumière latente les concessions que l'on a faites longtemps à l'occasion de la chaleur latente ; j'avouerai qu'il ne m'est pas encore donné de comprendre ce que peut être cet état dissimulé de la lumière. Après que Deluc et Black eurent découvert la chaleur latente au milieu du siècle dernier, on ne sut comment expliquer cette singulière manière d'être d'une force ordinairement toujours en action ; mais cette difculté ne fit pas rejeter un fait appuyé sur des preuves invincibles. J'espère que de même l'incompréhensibilité, dans l'état actuel de la science, de cet état latent ou combiné de la lumière, ne sera pas regardée comme une objection insoluble contre son existence, car les preuves et les objections sont les mêmes de part et d'autre. D'ailleurs, s'il est vrai qu'on ne peut pas déterminer l'intensité de la lumière latente, on ne peut pas plus, par des mesures quantitatives, apprécier

rigoureusement l'intensité de la lumière ordinaire. J'ai la certitude aussi que, sous d'autres points de vue, je donnerai à la science, si imparfaite cependant, de la lumière latente des développements que n'a pas reçus et que ne recevra même pas immédiatement des vastes découvertes de M. Melloni, la science de la chaleur latente.

» J'ai montré dans mon mémoire sur le procédé de la vision, que la précipitation des vapeurs produisait sur les corps qui les condensent les mêmes effets que la lumière. Mais il est nécessaire de donner une définition nouvelle de ce genre d'action, parce que dès l'instant où j'ai mis en évidence dans ces phénomènes la présence de la lumière latente, il ne faut pas demander à la rétine ou à l'œil l'appréciation des effets et des causes. La définition la plus large qu'on puisse admettre, au point où en est la science, est celle-ci : La surface des corps est modifiée de telle sorte par l'action de la lumière, qu'elle condense les vapeurs autrement qu'elle ne le faisait auparavant. Une plaque d'argent iodée qui, après avoir subi dans la chambre obscure l'action des rayons lumineux, est soumise aux vapeurs de mercure, qu'elle condense, nous offre un exemple simple de l'action que nous venons de définir.....

» Si la précipitation des vapeurs produit les effets de la lumière, n'est-on pas en droit de conclure à l'existence d'une lumière latente inséparable de l'état de vapeur, comme on a conclu l'existence du calorique à l'état latent de ce fait constaté par le thermomètre que, dans le changement d'état des corps, il y avait de la chaleur mise en liberté ou absorbée ? Pourquoi le noircissement, si je puis m'exprimer ainsi, du chlorure ou de l'iodure d'argent, n'aurait-il pas la même valeur que la dilatation ou la contraction du mercure et de l'alcool ? La comparaison ne sera-t-elle pas tout-à-fait concluante si je prouve que, réciproquement, la vaporisation ou le passage à l'état de vapeur reproduit encore les effets de la lumière ? Or, c'est ce qui a certainement lieu pour la vaporisation de l'eau, de l'alcool et de l'éther. J'ai expérimenté avec des plaques d'argent, d'or, de cuivre, de verre, que je mouillais de divers liquides sous la condition qu'ils ne modifiaient pas par eux-mêmes, d'une manière stable, les surfaces de ces corps, et que, par conséquent, on pourrait mettre en évidence l'action propre de la vaporisation. Ces expériences sont assez délicates, parce que l'eau distillée elle-même, surtout si on l'emploie en

grande abondance, laisse des traces sur les corps très-polis. Je suis cependant parvenu à des résultats incontestables en opérant comme il suit. Je plongeais la boule d'un très-petit thermomètre dans de l'eau distillée avec le plus grand soin, et j'écrivais sur la plaque avec la goutte adhérente, sans que la boule arrivât au contact, ou bien, j'étendais sur un drap humide des bandes de papier à filtrer et je les mouillais légèrement avec de l'eau distillée ; puis, avec ces bandes humides, je touchais pendant un moment les plaques polies. Si, après l'évaporation, il restait quelques traces, comme cela arrive fréquemment quand le liquide employé est l'alcool ou l'éther, je les faisais disparaître à l'aide d'une des poudres dont on se sert pour polir. Quand une plaque d'argent, par exemple, avait subi l'action de la vaporisation de l'eau, de l'alcool ou de l'éther, je l'exposais aux vapeurs de l'eau, du mercure, de l'iode, de l'acide chlorhydrique, du chlore, du bromure d'iode, et, dans tous les cas, j'obtenais une image parfaitement visible. Elle était ordinairement plus intense, quand la vapeur employée était la vapeur d'eau ; en prolongeant l'action de la vapeur de mercure, on lui donnait la même intensité de ton ; elle était toujours plus faible avec la vapeur d'iode. Mais il suffisait de présenter à la lumière la plaque frappée par la vapeur d'iode pour obtenir une image vigoureuse. En substituant d'autres métaux à l'argent on obtenait les mêmes effets ; la vaporisation avait, dans tous les cas, produit l'effet de la lumière. J'ajouterai encore que si l'on fait vaporiser de l'eau chaude sur une image de Daguerre, au moment où elle sort de la chambre obscure, l'image est entièrement détruite. Cet effet dépend d'une évolution de lumière, comme nous le prouverons pour ce qui nous reste à dire.

» Il est au moins certain que la vaporisation produit les mêmes effets de lumière que la condensation des vapeurs ; et je laisse aux physiciens à juger si ce résultat ne doit pas s'étendre au passage d'un corps solide à l'état liquide et réciproquement ; car ces passages doivent être attribués à un dégagement ou à une absorption de lumière aussi bien que de chaleur. Qu'il me soit permis, en considération de la nouveauté et de l'importance de cette assertion, de faire observer (en demeurant dans la région des preuves empiriques) que si l'on a d'une part une vapeur d'une élasticité et d'une température données, de l'autre une plaque quelconque d'une température aussi

connue, la condensation de la vapeur n'est pas par là même complétement déterminée, elle dépend, au contraire, des évolutions de lumière auxquelles la plaque a été soumise. Quoiqu'une plaque d'argent ait tous ses points à la même température, certaines parties déterminées de sa surface condenseront peu ou beaucoup de vapeur d'eau, suivant qu'elles auront subi à tel ou tel degré l'action de la lumière. Le même phénomène se reproduit pour les vapeurs de mercure, d'iode, de chlore... A part des différences secondaires, toutes les vapeurs se ressemblent en ce point, que leur condensation est également le résultat de l'action de la lumière et de la chaleur....

» Je passe maintenant à une question très-intéressante, relative à la lumière latente, à la détermination de la couleur qu'il faut lui attribuer. Cette détermination est aussi importante qu'elle est difficile... L'action bien connue de la lumière sur l'iodure d'argent suffit dans tout cas à répondre à tout. Voici l'énoncé du problème : l'iodure d'argent a subi l'action de la lumière ; cette lumière a été extérieurement appréciable ou non ; il s'agit de déterminer par quelle couleur l'action a été produite.

» Je n'ai pas épuisé la question, je crois cependant avoir considérablement avancé sa solution ; je suis arrivé dans tous les cas à des résultats bien dignes de fixer l'attention. Dans mon mémoire sur le procédé de la vision, j'avais établi, comme il suit, l'influence sur l'iodure des rayons de diverses réfrangibilités. Les rayons bleus et violets commençaient l'action et pouvaient la continuer jusqu'à noircir l'iodure d'argent : c'est le fait reconnu, il y a longtemps, par Scheele, par rapport au chlorure d'argent. M. Edmond Becquerel, faisant un pas de plus, crut découvrir que les rayons rouges ne commençaient pas l'action, mais qu'ils la continuaient avec force jusqu'à noircir l'iodure. J'ai observé enfin que les rayons verts et jaunes ramenaient l'iodure noirci à l'état d'iodure ayant sa couleur ordinaire. Les trois groupes bleu, rouge, jaune, je les désignerai ainsi pour abréger, auraient donc présenté une différence qualitative dans leur mode d'action sur la lumière, et cette différence d'action aurait cela de singulier qu'elle ne semble pas liée à la réfrangibilité du rayon, ou, pour parler plus exactement, avec la durée de ses oscillations. Ainsi, l'action serait commencée par les rayons de plus grande réfrangibilité, continuée par les rayons de plus petite réfran-

ibilité, poussée plus loin encore, et comme épuisée par les rayons e réfrangibilité moyenne. Ce résultat, quand je l'examinai plus ttentivement, me parut réellement incroyable, et je vais prouver ue je m'étais trompé.

» La vérité est que les rayons de toute réfrangibilité impressionnent le la même manière l'iodure d'argent ; qu'il n'est aucun effet qu'on ie puisse obtenir par l'action de toute sorte de rayons ; que la seule lifférence réelle consiste en ce qu'un même effet exige, pour sa pro- uction, plus ou moins de temps, suivant qu'il est produit par des ayons de telle ou telle couleur, de telle sorte, que si l'effet mesuré 'une manière quelconque est regardé comme une fonction du emps, cette fonction, pour les diverses couleurs, aura des formes rès-différentes.

» Pour prouver cette proposition, je rappellerai d'abord que iodure d'argent peut être noirci à travers des verres de toutes les ouleurs. On ne peut pas même élever l'ombre d'un doute par rap- ort aux verres violets, bleus, verts, jaunes, orangés ; j'ai eu l'occa- ion d'expérimenter avec un très-grand nombre de ces verres, et, uand j'opérais au soleil, l'effet ne s'est jamais fait longtemps atten- re. Il ne pourrait y avoir d'incertitude que par rapport aux verres ouges : j'en possède quelques-uns pour lesquels je croyais avoir bservé qu'ils laissaient à l'iodure d'argent sa couleur première, et u'ils ne pouvaient par conséquent, en aucune manière, commencer 'action. C'était une illusion et elle avait sa source dans la manière lont j'avais opéré : qui consistait à recouvrir la plaque iodée tout ntière d'un verre d'une couleur rouge uniforme. Dans ces circons- ances, il est très-difficile d'apprécier l'action lente produite. Mais n plaçant un dessin quelconque sous un de ces verres, dont on a endu quelques portions opaques, on s'assura facilement que la cou- eur rouge peut, aussi bien que les autres couleurs, donner naissance l'action, quoique plus lentement. Mon ami Dulk fut conduit avant noi, et par de semblables essais, à cette même conclusion : il avait ru que sous une cloche rouge foncé, l'iodure d'argent ne noircissait pas, même après des journées d'exposition à la lumière ; mais uand il eut placé sous la cloche une plaque abritée en partie par n écran, il aperçut, après quelques heures, l'image entière des bords le l'écran.

» Ainsi, toutes les couleurs partagent avec le bleu la propriété de commencer l'action et de la continuer jusqu'au noircissement ; elles exigent seulement, pour produire cet effet, un temps plus ou moins considérable. Je me permettrai à cette occasion une petite digression propre à prévenir une illusion dans laquelle il est facile de tomber. On dit communément que les verres bleus et violets laissent passer peu de rayons et agissent fortement sur l'iodure d'argent, tandis que les verres jaunes et rouges transmettent beaucoup de rayons et agissent très-peu. Il me semble, au point où en sont les choses, qu'on ne doit plus s'exprimer ainsi; c'est accorder aux impressions de l'œil plus d'importance qu'elles n'en méritent. On sait bien, à la vérité, que notre rétine est plus vivement impressionnée par le jaune et l'orangé, et que lorsqu'un spectre solaire est soumis à son appréciation, elle désigne ces couleurs comme étant les plus éclatantes ; mais si la rétine était d'une autre nature, si elle était, par exemple, de l'iodure d'argent, ou si elle était soumise libre, nue, à l'action de la lumière, son jugement signifierait tout autre chose. Pour elle alors, dans les mêmes circonstances, les rayons les plus brillants seraient les rayons violets, ou même les rayons obscurs découverts par Ritter. Il en est de toutes les substances sensibles à l'action de la lumière, comme de la rétine et des diverses combinaisons de l'argent ; parmi tous les rayons, il en est un, d'un nombre déterminé d'oscillations, qui produit le maximum d'action. Cela prouve, il me semble, au fond, que la rétine et les diverses substances sont peu propres à servir, par les impressions qu'elles reçoivent, de base à une comparaison entre les intensités des diverses couleurs. Le jugement par lequel la rétine semble affirmer que le verre violet laisse passer fort peu de rayons, est au fond et en lui-même très-peu concluant. Ce qui est vrai, c'est que les rayons de réfrangibilités inégales, sous le point de vue de leur influence sur l'iodure d'argent, diffèrent, non intrinsèquement, mais seulement par le temps plus ou moins long dont ils ont besoin pour agir. Et l'on voit qu'en réalité l'effet dépend uniquement de la durée des oscillations du rayon ; plus cette durée est grande, plus le rayon exige de temps pour commencer l'action et arriver à noircir l'iodure.

» J'arrive maintenant à la propriété particulière que posséderaient les rayons rouges de continuer une action commencée. Déjà, dans le

mémoire sur le procédé de la vision, j'ai élevé des doutes sur l'action propre de ce genre de rayons; j'ai déjà même indiqué le fait principal par lequel on peut combattre invinciblement cette manière de voir; mais je n'ai pas fait ressortir assez l'importance de ce fait. Sans doute que si on opère avec les rayons ordinaires du soleil, ou avec la lumière diffuse, pour obtenir, par exemple, une image daguerrienne, les rayons rouges se montreront plus énergiques que les autres, quand il s'agira de continuer l'action, parce qu'elle a été commencée par les rayons bleus ou violets, ou par les rayons obscurs de Ritter. Mais j'ai découvert et j'ai décrit une autre sorte de rayons de lumière émis, comme je le crois, sans exception, par tous les corps qu'on doit considérer comme lumineux par eux-mêmes; ces rayons sont rendus manifestes par ce fait, que deux corps placés à une distance assez petite impriment leur image l'un sur l'autre, quoiqu'on élimine avec le plus grand soin tout ce que la rétine appelle lumière. J'ai appelé ces rayons, *rayons invisibles*, pour les distinguer des rayons obscurs que Ritter a trouvés dans l'extrémité violette du spectre; j'aurais pu aussi les appeler *les rayons les plus réfrangibles*, car on verra que leur réfrangibilité est plus grande que celle des rayons ordinaires. Ils manquent d'ailleurs, comme je le prouverai dans la lumière du soleil et la lumière diffuse, ce qui empêche qu'on ne puisse les assimiler aux rayons obscurs. Or, si cette lumière invisible a commencé à agir sur l'iodure d'argent, les rayons violets ou bleus la continueront plus énergiquement que les rayons rouges, qui, cette fois, seront moins bons continuateurs. On place sur une plaque d'argent iodée des corps quelconques, au contact ou à une petite distance, dans la sphère d'activité des rayons invisibles, de telle sorte qu'il puisse en résulter des images. On laisse ces corps en place pendant un temps assez court pour que l'iodure ne subisse aucune altération sensible, pour que l'on ne puisse apercevoir aucune image; puis l'on expose la plaque iodée aux rayons du soleil ou à la lumière diffuse, sous un verre bleu ou violet; presque aussitôt l'image se montrera avec tous ses détails : les rayons jaunes ou rouges auraient à peine, dans les mêmes circonstances, fait apparaître quelques linéaments. C'est ce que j'avais indiqué dans mon premier mémoire : il en résulte que les rayons violets sont, par rapport à la lumière invisible, comme continuateurs, ce que les rayons rouges étaient par rapport à la

lumière ordinaire. Parmi toutes les expériences que j'ai faites à ce sujet, et qui toutes conduisent au même résultat, j'en rapporterai une seule qui aura l'avantage de me ramener à la couleur latente des vapeurs. J'espère rendre par là si claires les conclusions auxquelles je suis parvenu, qu'on me dispensera de l'énumération fatigante d'essais prouvant tous la même chose. J'iodurai une plaque d'argent et plaçai dessus une plaque en laiton gravée, une plaque d'argent aussi gravée, et un camée, pendant le très-court espace de deux minutes, et dans l'obscurité la plus profonde. Ce temps *écoulé*, on ne voyait naturellement rien sur la plaque ; mais après une exposition de quelques minutes à un soleil faible, sous un verre bleu, les images parurent ; celles des plaques gravées métalliques se montrèrent même riches de détails. Il avait donc suffi de deux minutes à la lumière invisible pour tracer les images : avec des verres jaunes ou rouges, on n'aurait probablement rien obtenu, car ces couleurs ne rendent sensibles qu'après une action prolongée les images causées par la lumière invisible....

» Si l'on adopte la proposition que nous avons essayé de démontrer ; si l'on admet que le temps pendant lequel une certaine sorte de lumière agit sur une substance peut compenser sa trop faible réfrangibilité, de telle sorte, par exemple, que l'action prolongée du rayon jaune puisse produire le même effet que l'action moins prolongée, mais plus intense, des rayons violets, on rendra compte sans peine de toutes les particularités du phénomène que l'on a désigné sous le nom de continuation. Lorsqu'une plaque d'argent iodée a été exposée un temps très-court à la lumière commune dans une chambre obscure, les rayons rouges peuvent seuls amener une image visible, tandis que les rayons jaunes et verts sont tout-à-fait inefficaces; au contraire, lorsque l'action des rayons ordinaires s'est exercée plus longtemps, on peut la considérer comme ayant été produite par des rayons d'une réfrangibilité plus grande, par les rayons violets, ou même par les rayons obscurs de Ritter ; dès-lors, les rayons jaunes et verts pourront continuer l'effet et mettre l'image en évidence. J'ai donné, dans mon premier mémoire, les preuves expérimentales de ces assertions; je n'y reviendrai pas. Si, enfin, les rayons invisibles ont commencé l'action et n'ont exercé leur influence que pendant un temps très-court, les seuls rayons bleus et verts rempliront le rôle

de continuateurs ; les rayons violets ne deviendront efficaces qu'autant que l'influence des rayons invisibles se sera prolongée pendant un temps plus long.....

» Je passe maintenant à l'action propre des rayons jaunes et verts, action qui ramène l'iodure noirci à l'état d'iodure coloré, et que j'ai constatée de bien des manières dans mon mémoire sur le progrès de la vision.

» La meilleure manière de procéder à ce genre d'expériences consiste à faire apparaitre sur la plaque, dans la chambre obscure, une image négative, ou dans laquelle les parties brillantes des objets paraissent sombres, pour l'exposer ensuite, sous un verre jaune ou vert, aux rayons du soleil ou à la lumière diffuse. On obtient alors une image positive provenant de ce que l'iode déjà noirci reprend sa couleur primitive, tandis que l'iode qui avait conservé sa teinte passe au noir. Tel est le fait remarquable signalé pour la première fois par M. Gaudin (*Comptes-rendus de l'Académie*, juin 1841). Il me sera facile de prouver que cette propriété curieuse n'appartient pas exclusivement aux rayons jaunes ou verts, qu'elle est commune aux autres rayons, et qu'ici encore il n'y a qu'une différence de temps ou de durée. On fait arriver une plaque d'argent iodée à l'état où, sous l'action des vapeurs de mercure, elle donnerait une image positive, puis on l'expose sous un verre rouge au soleil ou à la lumière diffuse : l'image obtenue sera négative. Si on place cette image négative sous un verre jaune, elle deviendra positive. Les rayons bleus et verts ne la rendront pas positive ; mais, si l'image positive a été poussée plus loin, c'est-à-dire si les rayons rouges ont agi plus longtemps, les rayons verts, et même les rayons bleus et violets, pourront la rendre positive. Ce résultat est si intéressant, que je crois devoir citer encore deux expériences qui le confirment. Une plaque d'argent iodée, laissée trois minutes dans la chambre obscure, fut placée ensuite sous un verre rouge jaune : on vit apparaître d'abord une image négative qui devint plus tard positive. Au moment où cette dernière commençait à apparaître, on plaça la plaque sous un vert violet : l'image positive se développa avec plus d'intensité. Une autre plaque iodée resta onze minutes dans la chambre obscure, exposée à un jour assez clair, qui donna naissance à une belle image négative, dans laquelle les parties claires apparaissent verdâtres et les parties som-

bres rougeâtres. L'exposition sous un verre bleu foncé fit naître, après une demi-heure, une forte image positive qui, au bout de plusieurs jours, n'avait subi aucun changement ultérieur.

» On voit maintenant de quelle manière les différents rayons impressionnent l'iodure d'argent; ils le noircissent tous et le font revenir dans des circonstances favorables à sa couleur première; mais ce double effet est produit dans un temps plus ou moins long, toujours en rapport avec la réfrangibilité du rayon. Voici comment, par une construction, on peut se rendre compte de l'effet propre des divers rayons. Si l'on représente, par les ordonnées d'une courbe dont les abscisses seront le temps, le degré de coloration de l'iodure d'argent, voici ce que sera cette courbe : pour les rayons bleus, violets ou obscurs de Ritter, la courbe s'élèvera avec une rapidité, comparativement très-grande, jusqu'à ce qu'elle atteigne une hauteur maximum correspondante à ce qu'on nomme le noircissement de l'iodure; au delà de ce terme, elle se rapprochera insensiblement de l'axe des abscisses. Pour les rayons jaunes et rouges, la courbe aura une course toute différente; elle marchera d'abord lentement et insensiblement vers le maximum; dès qu'elle l'aura atteint, elle se précipitera de nouveau et très-rapidement vers l'axe des abscisses. Quant à ce qui regarde les rayons invisibles, la courbe monte d'abord rapidement, mais elle atteint sa hauteur maximum bien plus tard que quand il s'agissait des rayons violets; car, quoique ces rayons opèrent le noircissement de l'iodure, comme je l'ai prouvé dans mon premier mémoire, et bien souvent depuis, c'est seulement après un temps bien plus long. Il n'existe, il est vrai, aucun moyen de mesurer l'intensité de ces rayons invisibles et de la comparer avec celle des rayons violets, mais il est constant qu'ils peuvent, dans deux minutes, commencer l'action. Mes expériences ne me permettent pas encore d'indiquer ce que devient, au delà du maximum, la courbe qui représente leur action.

» Je crois qu'il est de mon devoir de prévenir ici une erreur dont mon premier mémoire pourrait devenir la cause. Lorsque j'ai parlé de l'action de rayons jaunes et verts, j'ai insinué qu'on pourrait obtenir le même effet à l'aide des rayons solaires ou de la lumière diffuse. Cela est vrai; mais, dans l'état actuel de la science et avec la connaissance plus parfaite que nous avons de la manière d'agir des

trois groupes de couleurs, on ne pourrait plus admettre que l'effet produit par la lumière ordinaire est dû exclusivement, comme je l'avais dit, à la présence des rayons jaunes ou verts. J'ai prouvé depuis que les rayons violets ou bleus pouvaient aussi ramener l'iodure noirci à sa première nuance, et je dois ajouter que quand la lumière naturelle produit cet effet, on doit l'attribuer, pour la plus grande partie, à l'influence de ces deux couleurs. En effet, lorsque les rayons bleus sont insuffisants à transformer une image négative en image positive, les rayons solaires et la lumière diffuse présentent la même incapacité. Ici comme partout généralement, la lumière non décomposée agit absolument comme les rayons violets ou bleus; parmi les innombrables expériences que j'ai répétées sous toutes les formes, il n'en est aucune qui puisse différencier convenablement l'action de la lumière commune sur l'iodure d'argent d'avec l'action de ces deux couleurs. Ce fait bien constaté m'a seul forcé d'affirmer qu'on ne pouvait pas s'arrêter à l'iodure d'argent, et qu'il fallait étudier l'action des diverses couleurs sur d'autres substances. On verra combien triste est cette nécessité quand il s'agira de déterminer la couleur latente de la vapeur d'eau.

» Le fait, désormais établi, de l'unité d'action de toutes les couleurs sur l'iodure d'argent, semble rendre impossible la solution du problème que nous nous étions proposé : étant donné l'effet produit sur l'iodure, déterminer la réfrangibilité des rayons auxquels cet effet doit être attribué. Comment, en effet, parce que la condensation des vapeurs de mercure a produit un certain effet de lumière, déterminer la couleur de la lumière latente de cette vapeur, puisque toutes les couleurs peuvent produire ce même effet, et ne diffèrent entre elles que par des intensités que l'on ne peut pas mesurer ? J'avoue que le problème serait réellement resté insoluble, et que la détermination de la couleur latente des vapeurs serait restée inabordable, si je n'avais pas été assez heureux pour trouver dans l'action mutuelle et successive de deux rayons de réfrangibilités diverses une propriété caractéristique qui rend possible la détermination au moins approximative de la couleur latente des vapeurs, et qui fait faire un pas à la solution du problème plus général qui nous a occupé jusqu'ici. J'appellerai cette propriété *la faculté de niveler ;* les fait sur lesquels elle repose conduisent à un moyen encore empirique, il est vrai,

mais, qu'on me permette cette expression, d'un prix inestimable, quand il s'agit de différencier les diverses couleurs sous le rapport de l'action qu'elles exercent sur l'iodure d'argent. Les considérations théoriques sur lesquelles s'appuie cette même propriété appartiennent à un autre ordre de phénomènes que j'espère développer un jour.

» Voici les circonstances dans lesquelles a lieu ce que j'appelle le *nivellement*. On porte une plaque iodée dans la chambre obscure, et on l'y laisse jusqu'à ce qu'elle soit arrivée à cette période qu'on peut appeler daguerrienne. On ne voit alors aucune trace de l'image, quoiqu'elle soit réellement produite, ainsi que le prouve l'action des vapeurs de mercure. Si maintenant on expose cette plaque à la lumière diffuse ou solaire, on n'y verra apparaître aucune image, elle se noircit de plus en plus. Je dirai, dans ce cas, que la lumière non décomposée a *nivelé* l'image, en ce sens qu'elle ne laisse aucune différence entre les portions impressionnées et celles qui ne l'avaient pas été. Le phénomène eût été plus frappant si on avait laissé la plaque dans la chambre obscure assez longtemps pour obtenir une image négative. Cette image négative aurait été elle-même nivelée dans les mêmes circonstances, à moins toutefois qu'on ne l'eût comme exaltée en la rendant plus intense; car, dans ce cas, sous l'influence de la lumière ordinaire, ou même d'une couleur quelconque, elle se serait transformée en une image positive, ainsi que nous l'avons déjà dit. Ce nivellement de l'image n'est pas essentiellement lié à l'action simultanée des divers rayons dont se compose la lumière blanche, car on l'obtient avec la seule lumière violette ou bleue, en partie même avec le vert. Les deux premières couleurs nivellent tout aussi bien que la lumière blanche une image daguerrienne, et même une image négative qui n'a pas été très-développée.

» En considérant le fait que nous venons d'énoncer dans les rapports qu'il peut avoir avec le problème qu'il s'agit de résoudre, relativement à l'action d'une couleur unique, nous arriverons à l'expression suivante des phénomènes du nivellement. Lorsque les rayons ordinaires ont agi dans la chambre obscure, pendant un temps très-court sur l'iodure d'argent, les rayons de toute réfrangibilité nivelleront l'image qu'il faut toujours supposer produite, quoiqu'on ne puisse pas arriver à la voir. Si la lumière a agi plus

longtemps, tous les rayons, à l'exception du rouge, nivelleront encore l'image; l'impuissance des rayons rouges vient de ce que leur réfrangibilité diffère assez de celle des rayons qui ont commencé l'action. Si la plaque demeure plus longtemps encore dans la chambre obscure, on peut supposer, par analogie, que l'image produite est due à des rayons d'une réfrangibilité plus grande que celle des rayons bleus, violets, obscurs, et dès-lors les rayons jaunes ne pourront plus la niveler. Enfin, si la plaque a séjourné plusieurs heures ou un jour dans la chambre obscure, les rayons violets et bleus eux-mêmes ne pourront plus la niveler, comme nous l'avons déjà montré.

» Si l'on veut étendre cette observation aux rayons invisibles qui se sont manifestés dans divers phénomènes comme doués d'une plus grande réfrangibilité relative, le nivellement conservera son caractère différentiel, et deviendra un moyen de déterminer la réfrangibilité relative dans des cas où la méthode employée pour les rayons ordinaires ne serait en aucune manière applicable. Cela posé, puisque les rayons les plus réfrangibles du spectre nivellent les images comprises dans la période daguerrienne, il fallait que les rayons invisibles montrassent la même efficacité. Pour prouver qu'il en était ainsi, j'ai laissé un certain nombre de plaques dans la chambre obscure, le temps nécessaire pour que, sous l'influence des vapeurs de mercure, elles pussent donner des images fort exactes d'un certain point de vue; puis, j'ai placé ces plaques sur de l'argent pur, de l'or, du cuivre, du métal, des miroirs, de l'argent iodé, de la porcelaine..., au contact toujours partiel, ou à une petite distance déterminée par l'épaisseur de lames de mica. Lorsqu'elles avaient ainsi séjourné quelque temps dans l'obscurité, leur image était le plus souvent complètement nivelée; quelquefois, la vapeur de mercure faisait encore apparaître quelques linéaments, mais ils étaient isolés. Les rayons invisibles avaient donc nivelé les images produites par les rayons visibles; ils pourraient même niveler des images à la formation desquelles ils auraient concouru, pourvu qu'on ne les supposât pas arrivées à un état trop avancé. On a déposé pendant une ou plusieurs heures sur une plaque d'argent iodée diverses substances, de l'argent, de l'or, du fer, de la corne, qui y ont imprimé leur image; et l'on a vu que le contact suffisamment prolongé

d'une plaque d'argent ou de fer nivelait toutes les images : qu'on ne pouvait, par aucun moyen, les rendre ultérieurement visibles. Si l'image produite par les rayons invisibles a été trop développée, ils ne peuvent plus les niveler eux-mêmes, comme je m'en suis souvent assuré.

» Les rayons visibles, au contraire, ne peuvent jamais niveler une image excitée par les rayons invisibles, et ce fait suffit seul à prouver que la réfrangibilité de ces derniers rayons est plus grande que celle des rayons du prisme. Il serait superflu d'étayer cette assertion de preuves nouvelles; car je suis redevable de mes découvertes à cette circonstance, que les images produites par les rayons invisibles ne peuvent être détruites par aucune lumière visible; sans cette particularité, je n'aurais pas constaté l'action identique de la lumière sur tous les corps, et l'extension à toute sorte de vapeurs de l'action exercée dans les expériences de Daguerre par la lumière commune.

» Comme on le voit, le phénomène du nivellement sous l'influence des rayons de différentes réfrangibilités nous fournit le moyen tant désiré de séparer des rayons ordinaires le groupe des rayons invisibles; et, pour prévenir toutes les objections que l'on pourrait encore faire, il n'est guère plus nécessaire de recourir à des expériences faites avec les rayons invisibles au sein de ce qu'on nomme obscurité ou nuit. Ces deux sortes de rayons se différencient avec tant de facilité que j'ose maintenant répondre à cette question : Y a-t-il ou non dans la lumière diffuse ou solaire des rayons dont la réfrangibilité soit celle des rayons invisibles? Leur présence n'est-elle pas constatée dans la chambre obscure par cela seul que les images placées en dedans ou en dehors de la période daguerrienne sont nivelées par la lumière bleue ou violette? Si, au contraire, ils n'existaient pas dans la chambre obscure, ne pourrait-on pas dire que c'est parce qu'ils ont été absorbés dans le passage à travers la lentille? Il était donc nécessaire d'opérer à l'air libre. J'exposai, en conséquence, aux rayons immédiats du soleil, pendant une ou deux secondes, une plaque d'argent iodée recouverte d'un écran placé à une petite distance; puis, après avoir enlevé l'écran, je le plaçai au soleil sous un verre bleu; aucune image ne se montra. Pour appuyer ce résultat négatif d'un fait positif, je laissai une

autre plaque trois secondes derrière l'écran, puis pendant l'éclipse du 8 juillet, je l'exposai 14 secondes à l'action directe du soleil : j'aperçus bientôt une image fort distincte des découpures. Quand après cela on présentait la plaque au soleil sous un verre bleu, l'image, au bout d'un temps très-court, était nivelée et complètement effacée. Sous les verres rouges, jaunes, verts, on voyait se développer des images de même nature beaucoup plus distinctes. Il est donc prouvé que les rayons invisibles ne sont pas compris parmi les rayons solaires, puisque l'image que les rayons solaires produisent est nivelée par les rayons violets ou bleus, exaltée par les autres rayons visibles; ils n'existent pas davantage dans la lumière diffuse, comme je m'en suis convaincu par de nombreuses expériences.

» Si les rayons émis par tous les corps devenus lumineux par eux-mêmes manquent dans la lumière solaire, est-ce parce qu'ils ont été absorbés par l'atmosphère, ou bien cette absence ne doit-elle pas trouver son explication dans les phénomènes du mouvement propre des corps élastiques ? Je n'examinerai ici aucune de ces hypothèses, sur lesquelles mes expériences n'ont encore jeté aucune lumière.

» Ces développements une fois donnés, il est facile de déterminer la couleur latente de quelques vapeurs ; considérons d'abord la vapeur de mercure. Sa lumière latente n'est ni bleue ni violette, puisque ces couleurs nivellent les images daguerriennes que les vapeurs de mercure exaltent et rendent visibles. On peut dire que l'absence de toute lumière bleue dans la vapeur de mercure est un bonheur pour la daguerréotypie ; sans cela elle ne serait pas possible avec les rayons visibles. On comprend assez, parce qui vient d'être dit, que la vapeur de mercure ne contient non plus aucune lumière blanche. Elle ne peut pas non plus renfermer à l'état latent de la lumière rouge ; car, après qu'on a laissé la plaque d'argent iodée dans la chambre obscure pendant un temps trop court, on n'obtient pas d'image par l'action des vapeurs de mercure, tandis qu'elle apparaît très-bien sous l'influence d'un verre rouge. Je rapporterai ici une des expériences que j'ai faites à ce sujet. Dans un jour tel que les images daguerriennes se formaient avec une très-grande netteté en dix minutes, je laissai une minute dans la chambre

obscure une plaque iodée, laquelle, placée ensuite sous un verre rouge, donna une image complète, mais négative. Je laissai cette même plaque une minute, deux, trois minutes dans la chambre obscure et l'exposai aux vapeurs de mercure : il ne se montra aucune image, alors même que je la laissais trois jours entiers sur du mercure chauffé plusieurs fois jusqu'à plus de 60°; tout ce que j'obtenais, c'était une couche uniforme de mercure condensé, mais aucune trace d'image. A différentes époques, et lorsque j'étudiais le rôle des vapeurs en général, ce résultat m'avait vivement intrigué. Éclairé maintenant par la considération nouvelle de la couleur latente de la vapeur, je comprends qu'il ne pouvait en être autrement que je ne devais obtenir aucune image. Dans l'intérêt de la daguerréotypie, on doit regretter que la couleur latente des vapeurs de mercure ne soit pas rouge; car, si elle était rouge, on obtiendrait les images après une exposition bien moins prolongée à la lumière, et ces images n'auraient probablement pas ce ton gris monotone qui fatigue.

» La couleur de la lumière latente des vapeurs de mercure est jaune; tous les phénomènes connus s'unissent pour ne laisser aucun doute à ce sujet. Quand l'image reçue par une plaque d'argent iodée est arrivée au point où elle ne peut plus être nivelée par les rayons jaunes, les vapeurs de mercure la font ressortir. A une période moins avancée, les vapeurs de mercure, aussi bien que les rayons jaunes, engendrent l'image. Le noircissement que la lumière jaune produit si facilement, s'obtient avec non moins de facilité à l'aide des vapeurs de mercure; il semble même que le ton gris ordinaire ou le ton brun des images daguerriennes, surtout quand elles sont riches de détails, vienne en partie du noircissement de l'iodure par les vapeurs de mercure. De même que la lumière jaune transforme facilement en images positives les images négatives qu'on obtient dans la chambre obscure; de même les vapeurs de mercure, par leur action prolongée ou par une tension plus élevée, retournent l'image ordinaire, comme je l'ai déjà montré. La lumière jaune produit le renversement en noircissant l'iodure qui n'avait pas été impressionné, et en rendant sa couleur à l'iodure noirci; les vapeurs de mercure agissent de la même manière sur les portions qui n'avaient pas été modifiées, et produisent ainsi les ombres des images

positives. C'est lui qui, en ces endroits, a commencé l'action ; s'il la continue, il se condensera sur les mêmes parties sombres et renversera l'image. C'est ainsi que les choses se passent en réalité, et il faut, sous ce rapport, modifier l'opinion que j'ai émise dans mon premier mémoire ; je me suis trompé en disant que le mercure semble fuir plus tard les portions de la plaque qu'il avait d'abord impressionnées.

» Quant la lumière jaune opère le renversement d'une image négative, à un certain instant, on ne peut distinguer aucune image ; plus tard l'image positive apparaît. Si l'on retire l'image au moment où l'on ne voit plus rien pour la soumettre aux vapeurs du mercure, le renversement continuera de s'effectuer ; l'image positive sera bientôt visible, et l'on ne pourra pas la distinguer de celle qu'on eût obtenue sous un verre jaune. La quantité de vapeurs de mercure qui s'est condensée sur la plaque est trop insignifiante pour différencier les deux images.

» La manière dont la vapeur de mercure se comporte relativement aux effets de lumière produits par les rayons invisibles, est aussi caractéristique que concluante pour la nature de sa couleur latente. Elle ne détruit jamais l'image produite par ces rayons ; au contraire, elle la rend souvent visible par son action continuée. C'est seulement quand les rayons invisibles ont longtemps agi que l'image produite s'évanouit rapidement dans la vapeur de mercure. Je ne pus deviner d'abord la raison de cette disparition ; elle n'est plus un mystère pour moi depuis que j'ai vu que les rayons jaunes produisent le même effet. Ils ne nivellent aucune des images dues à l'action des rayons invisibles sur l'iodure d'argent ; mais il faut attendre longtemps, alors même que l'image, sous un verre jaune, est exposée aux rayons du soleil, pour la voir apparaître lorsqu'elle se trouvait dans les premières périodes de sa formation. Encore alors ne voit-on ordinairement que quelques linéaments épars, parce que probablement les verres jaunes, comme les verres rouges, transmettent beaucoup de rayons calorifiques qui modifient l'iodure en détruisant l'image.

» Pour ce qui regarde la vapeur d'iode, la couleur de sa lumière latente est le bleu ou le violet, car cette vapeur nivelle infailliblement toute image placée dans la période daguerrienne ; elle nivelle même



une image négative passablement développée, ce qui suppose nécessairement que cette vapeur ne renferme ni rayons rouges ni rayons jaunes ou verts, et se comporte tout-à-fait comme des rayons bleus ou violets. Si l'image négative est très-exaltée, comme elle l'était dans une circonstance où j'avais laissé la plaque dix heures dans la chambre obscure, la vapeur d'iode, malgré son action prolongée, ne la nivelle plus, elle est toujours reconnaissable quoique diversement colorée.

» Pendant que la vapeur d'iode nivelle si facilement et si complétement les images produites par les rayons ordinaires, elle fait si bien apparaître les images excitées par les rayons invisibles, qu'elle remplace avec avantage les verres bleus ou violets. J'avais placé sur une plaque d'argent iodée, une lame de laiton gravée, un morceau de fer, une petite plaque d'argent et un anneau en corne noire; la plaque ne montra d'abord rien; mais quand je l'eus portée dans la vapeur d'iode, l'iodure jaune prit une couleur bleue, les images des divers objets devinrent très-visibles et se développèrent avec tous les détails sous un verre bleu.

» Si l'on examine de plus près la nature de la vapeur d'iode, on arrivera à cette conclusion, que l'impressionnabilité de la plaque d'argent n'est pas toujours exaltée par son ioduration. Si l'on veut obtenir quelques effets dans la chambre obscure avec les rayons ordinaires, il est très-nécessaire d'iodurer l'argent, ce qui est en réalité le soumettre à l'action de la lumière bleue ou violette mise en liberté par la condensation de la vapeur d'iode. Mais cette ioduration ne sert à rien quand on doit opérer avec les rayons invisibles; il est alors aussi indifférent d'ioder la plaque, qu'il le serait, dans les expériences ordinaires, d'exposer cette même plaque à l'action des rayons jaunes ou rouges avant de la placer dans la chambre obscure. On devait penser qu'il importait peu, pour obtenir une image visible, d'exposer d'abord la plaque d'argent pur à l'action de la lumière, puis de faire agir la vapeur d'iode; l'expérience a pleinement confirmé cette prévision qui avait sa source dans la nature connue des rayons invisibles et de la vapeur d'iode. Sur une plaque d'argent pur on plaça du laiton, de la corne, du verre, pendant deux minutes seulement. Lorsque ensuite on exposa la plaque à la vapeur d'iode l'image de ces divers objets devint visible quoique faible; sous un

verre bleu elle devint plus forte, plus riche en détails. J'ai eu souvent l'occasion de répéter la même expérience, et j'ai toujours vu que l'ioduration ne rendait pas l'argent pur plus sensible à l'action des rayons invisibles. Une seule circonstance doit engager à iodurer d'abord la plaque, c'est qu'elle ne se revêt d'une couche bien égale d'iode qu'immédiatement après qu'on vient de la polir...

Les vapeurs de chlore, de brome, de chlorure ou de bromure d'iode, ressemblent beaucoup aux vapeurs d'iode, ou n'en diffèrent que très-peu. Elles montrent, en général, les mêmes propriétés, et si la réfrangibilité de leur vapeur diffère de celle de la vapeur d'iode, il m'a été impossible jusqu'ici de déterminer expérimentalement la différence.

Les vapeurs d'eau, dans tous les phénomènes qui se sont manifestés devant moi, se comportent absolument comme la vapeur d'iode; les unes et les autres nivellent ou produisent les mêmes images. Toute image comprise dans la période daguerrienne est nivelée par la vapeur d'eau; il suffit même de couvrir deux ou trois fois de son haleine la plaque qui sort de la chambre obscure, ou de l'exposer aux vapeurs de l'eau chaude pour que l'image soit entièrement détruite et ne puisse plus être mise en évidence par les vapeurs de mercure. Au contraire, quand les rayons invisibles ont produit une image sur quelque substance que ce soit, la vapeur d'eau ne la nivelle jamais, elle l'exalte au contraire; si d'abord elle était faible, une insufflation humide répétée la rend bientôt plus visible.

» On prend une plaque d'argent iodée, sur laquelle s'est produite une image que l'on ne peut pas apercevoir. Si cette image a été obtenue dans la chambre obscure, ou plus généralement si elle est due à l'action des rayons visibles, non-seulement les vapeurs d'iode et d'eau ou l'exposition sous un verre bleu ne la rendront pas visible, elle sera nivelée ou détruite. Si, au contraire, elle avait pour cause l'action des rayons invisibles, les vapeurs d'iode et d'eau ou l'exposition sous un verre bleu la feraient ressortir.....

» Je terminerai ce mémoire en montrant, par un exemple, comment des phénomènes quelque peu compliqués s'expliquent facilement par la connaissance de la couleur latente des diverses sortes de vapeurs : cet exemple a d'ailleurs une importance assez grande relativement à l'extension pratique des expériences de ce genre. Si on



laisse la lumière invisible agir pendant un temps relativement court sur le cuivre pur, on verra l'image apparaître, après quelques heures, sous l'influence des vapeurs de mercure à la tension ordinaire. Si l'on retire la plaque plus tôt, on ne voit souvent aucune trace de l'image; mais, si on l'expose actuellement à la vapeur d'iode, on verra, après quelques secondes, l'image apparaître complète dans tous ses détails. J'avais déjà trouvé depuis longtemps, et j'avais recommandé, dans mon premier mémoire, cette manière d'opérer, sans avoir pu m'expliquer à moi-même pourquoi l'emploi préalable des vapeurs de mercure est si avantageux, quoique ces vapeurs, par une action intense, ne puissent faire ressortir aucune image. L'explication devient très-facile dès qu'on admet que la couleur latente de la vapeur de mercure est jaune. Il est évident que la lumière jaune est, par rapport à la lumière invisible, surtout quand celle-ci a agi un certain temps, ce que la lumière rouge est à la lumière violette ou obscure; et la plaque de cuivre qui, après avoir reçu l'impression des rayons invisibles, est soumise d'abord à la vapeur de mercure, puis à la vapeur d'iode, est à peu près dans le même état de modification qu'une plaque d'argent iodée qui, après avoir séjourné un certain temps dans la chambre obscure, est exposée successivement à l'action des rayons rouges et des rayons jaunes ou verts. Dès que j'eus trouvé le principe sur lequel repose cette expérience, je vis *à priori* que cette manière d'opérer serait partout excellente : j'avais trouvé le moyen de réaliser une série d'expériences et d'étudier l'effet des rayons invisibles sur l'or, l'argent pur, le laiton, le fer, l'acier, le zinc, le fer-blanc verni ordinaire. Faire agir sur l'argent, d'abord la lumière, ensuite le mercure, et enfin la vapeur d'iode, c'est précisément l'opération inverse de celle qui a été découverte par M. Daguerre, et elle a sa raison dans ce fait : que quand il s'agit des rayons invisibles, la réfrangibilité, et par conséquent la vitesse des oscillations, est plus grande.

3me MÉMOIRE. — *Quelques remarques sur la lumière invisible, Annales de Poggendorff*, vol. LVIII, p. 560 et suivantes, 1842, n° 8.

« Comme la lumière invisible semble intéresser vivement le monde savant, je crois devoir publier encore quelques-unes des expériences que j'ai faites sur ce sujet.

« I. En outre des substances que j'ai signalées dans mon mémoire

sur le procédé de la vision, j'ai obtenu l'image des corps suivants: l'or, le cuivre, le bismuth, l'antimoine, l'étain, le plomb, le métal des miroirs, le métal des caractères, le zinc, le verre blanc transparent, le bois, les perles, le carton noir, le cuir noir, le velours noir, le noir de fumée. J'ai recouvert un objet en fer d'une forme convenable, d'un enduit épais de noir de fumée, et je l'ai placé à une petite distance d'une plaque d'argent pur. Lorsque ensuite cette plaque fut exposée aux vapeurs d'iode, elle donna une image très-distincte.

« Ce serait donc une immense découverte que de trouver, ce qui me semble impossible, une substance qui n'émettrait aucune lumière propre, ou qui l'émettrait à un trop faible degré pour qu'on ne pût pas la mettre en évidence. Nier, en attendant, le pouvoir lumineux propre des corps, ce serait ne tenir aucun compte d'une foule d'expériences incontestables ; je ne m'arrêterai pas davantage sur ce point.

« Afin d'écarter jusqu'à la pensée que les résultats que j'ai obtenus étaient dus à une lumière étrangère, et non à la lumière propre des corps, j'ai eu soin de faire presque toutes mes expériences dans ce qu'on appelle l'obscurité. Mais, comme je l'ai déjà dit, cette précaution était réellement inutile; car la lumière invisible est douée de propriétés si caractéristiques, si tranchées, qu'il est impossible de les confondre avec la lumière ordinaire.

« Considérées, toutefois, sous le point de vue physique, ces deux lumières ne diffèrent entre elles que comme le violet diffère du rouge, et la méthode qui apprend à discerner l'une de l'autre ces deux couleurs, s'étend d'elle-même aux rayons visibles et invisibles, abstraction faite d'une différence de réfrangibilité. On est forcé d'admettre qu'il n'est *aucun effet produit par une de ces lumières qui ne puisse aussi bien être produit par l'autre.*

« II. Jusqu'à présent j'ai fait agir les rayons invisibles sur l'or, l'argent, le cuivre, le laiton, le fer, l'acier, le zinc, l'argent iodé, l'iodure noirci par la lumière, le cuivre rendu artificiellement pourpre, le verre, la porcelaine, le mica, le fer-blanc verni ordinaire, et le mercure. Pour expérimenter avec cette dernière substance, je recouvrais d'un amalgame abondant une lame de plaqué, de telle sorte que le mercure fluide se trouvait à la surface. Les corps que j'ai fait agir sur cette couche liquide étaient de fer, de corne, un



coin d'acier. L'image produite sur le mercure était d'abord invisible; mais les vapeurs d'iode la faisaient bientôt apparaître entière, et si parfaite, qu'on pouvait lire facilement les mots gravés sur le coin d'acier.

« Les substances indiquées ne diffèrent dans leur action que suivant le degré du poli qu'on peut leur donner ou qu'elles ont par elles-mêmes. Le mica donne de très-belles images; il en est de même du cuivre quand il est bien poli. Je possède une plaque dont la surface se compose de quatre métaux, de laiton, de cuivre, de zinc et de fer; quand, après avoir fait agir sur elle une plaque d'agate gravée, je l'exposai à l'action d'une vapeur, chaque métal reproduisit l'image de la portion qui l'avait influencé; celle du fer était seule peu apparente, parce qu'il était mal poli. Une plaque d'acier, au contraire, douée d'un beau poli, m'a donné de très-bonnes images.

« Dans tous les cas où je l'ai pu, j'ai fait agir d'abord la vapeur de mercure à la tension ordinaire, puis la vapeur d'iode; ce procédé, qui m'a toujours réussi depuis, m'avait surtout paru avantageux quand j'opérais avec le fer-blanc vernissé.

« Après tant d'expériences et d'observations, il n'est pas permis de douter que la lumière agit également sur toutes les substances, et que deux corps mis en présence imprimeront toujours l'un sur l'autre leur image; la seule chose difficile dans les diverses circonstances où l'on opérera sera de mettre les images en évidence.

« III. Au premier rang de ces circonstances ingrates, il faut placer la divergence des rayons, divergence aussi inséparable de la lumière invisible que de la lumière visible, et qui oblige à ne pas trop éloigner les corps dont on observe l'influence mutuelle. S'ils ne sont pas suffisamment rapprochés, les images seront peu visibles. Je plaçais d'abord la plaque d'argent à un dixième de millimètre; plus tard je la plaçai à un millimètre: en choisissant convenablement les objets, j'obtenais encore des images distinctes, au moins sur presque tous les points.

« Si l'on examine attentivement les conditions nécessaires à la formation de l'image des corps par l'influence de leur lumière propre, on reconnaîtra que les surfaces gravées sont surtout efficaces; que des ciselures en relief produisent très-peu d'effet: une plaque gravée, d'agate, de bois, des coins de médaille en fer ou en acier, des matri-

ces de caractères bien formées, m'ont toujours réussi dans mes expériences. Pour ces matrices, une certaine distance produit un excellent effet; leurs lignes, quelque peu dures, sont alors avantageusement remplacées par des ombres mieux fondues. L'écriture noire, tracée sur papier blanc, se reproduit assez pour qu'on puisse la retrouver, mais pas assez pour qu'on puisse la lire. Il en est ainsi des mosaïques : leurs petits compartiments se peignent avec une netteté surprenante, tandis qu'il m'a toujours été impossible d'obtenir des images distinctes d'une figure dont les diverses parties ne différaient que par la couleur. J'appellerai surtout l'attention sur ce fait important, que les parties d'un corps quelconque qui, à la lumière empruntée du jour, sont pour nos yeux séparées et tranchées, n'apparaissent pas nécessairement distinctes dans l'image produite par leur lumière propre.

« IV. En terminant, j'indiquerai encore une méthode par laquelle on mettra facilement en évidence l'action de la lumière visible sur beaucoup de substances, méthode qui réussirait peut-être pour toutes, si on n'était pas contraint de donner à la lumière un degré d'intensité qui rend inévitable l'action perturbatrice de la chaleur ; je plaçai un morceau de miroir de verre au foyer d'une petite chambre obscure, munie d'une lentille de 15 millimètres d'ouverture, et la dirigeai vers le soleil, dont je voulais obtenir l'image. Quand le soleil eut passé devant la plaque, je la retirai et la couvris de mon haleine : j'aperçus aussitôt l'image visible et nette de la course de cet astre.

« J'ai répété avec succès cette expérience en employant tour à tour l'argent, l'or, le cuivre, le fer, l'acier, le laiton, le zinc, la plaque formée de plusieurs métaux dont j'ai déjà parlé, etc. A la vapeur d'eau on peut substituer la vapeur de mercure.

« Pour éviter l'objection qu'on aurait pu faire, que l'effet obtenu dans cette expérience devait être attribué à la chaleur, j'ai fait agir le soleil sur une plaque d'argent pur à travers des verres jaune, rouge vif et violet assez clair. Quand, plus tard, j'exposai la plaque à l'influence de la vapeur, l'image du soleil se montra visible, quoique peu intense, à l'endroit où la lumière jaune avait agi. Elle apparut aussi très-bien là où les rayons violets avaient frappé; mais il fut impossible d'apercevoir même une trace de l'efficacité du verre

rouge; et cependant j'avais pris la précaution de donner au verre rouge la meilleure place, je l'avais fixé sur l'axe même de la lentille.

« Une autre fois, je fis agir le soleil à travers deux verres rouge et bleu, dont chacun occupait la moitié du champ de la lentille; il en résulta sous le verre bleu une image distincte de la course du soleil, sous le verre rouge absolument rien. Comme on le voit, ces résultats s'accordent parfaitement avec ce qu'on savait de l'efficacité des rayons lumineux de diverses couleurs, mais nullement avec les données de la science, relatives à la transmission de la chaleur. *Je m'assurai*, par des expériences faites sur une de ces aiguilles d'argent ou de fer proposées par M. Poggendorff comme très-sensibles à l'action de la chaleur, que, parmi tous les verres que j'avais employés, le verre rouge était celui qui transmettait en plus grande abondance les rayons calorifiques, et cependant le verre rouge ne m'avait jamais donné l'image du soleil. »

4° MÉMOIRE. — *Sur la différence entre les rayons lumineux et les rayons calorifiques*, Annales de Poggendorff, vol. LVIII, 1843, numéro 1.

« Si l'existence d'une lumière invisible que tous les corps émettent, comme ils rayonnent de la chaleur; si la part que prend la lumière, ainsi que le calorique, au changement d'état des corps, rapprochent beaucoup ces deux agents, il me semble, toutefois, que l'ensemble des observations repousse leur identité, et démontre qu'il existe entre eux des différences essentielles.

« 1° C'est une propriété bien connue de la chaleur de se répandre dans toutes les directions, au-dehors comme à l'intérieur de la substance dans laquelle elle a été excitée. Rien de semblable ne se manifeste pour la lumière; le contraire est même prouvé par les contours si nets, si tranchés des images daguerriennes, et plus évidemment par la série suivante d'expériences que j'ai entreprises à ce sujet. On sait que les plaques d'argent ordinairement employées sont recouvertes à leur surface d'une couche d'iodure dont l'épaisseur, suivant M, Dumas, n'atteint pas un millionième de millimètre; or, une de ces plaques fut constamment exposée à la lumière, et autant que possible aux rayons directs du soleil à partir du 20 février: le 30 juin, après qu'elle eût été légèrement frottée, elle se montra encore sensible à l'action de la lumière, et j'ai constaté que l'action

continue du soleil pendant l'été qui vient de s'écouler n'avait pas même pu pénétrer la couche infiniment mince d'iodure. D'autres plaques ont été frottées sept ou huit fois après une longue exposition à la lumière sans qu'elles aient cessé d'être recouvertes d'iodure sensible.

« 2° Si l'on considère la répartition de la lumière et de la chaleur dans le spectre solaire, il ne faudra pas moins renoncer à l'idée d'identité, car les rayons lumineux partis de cette portion du spectre où la chaleur est la plus grande, c'est-à-dire du voisinage du rouge, sont précisément ceux qui agissent le moins sur l'iodure d'argent, et vraisemblablement sur le plus grand nombre des corps. J'ai, il est vrai, pu prouver que les rayons rouges agissent comme les autres, qu'ils ont, par exemple, assez d'efficacité pour noircir l'iodure d'argent ; mais pour opérer un même effet, ils ont besoin d'un temps comparativement très-grand. L'expérience suivante est, sous ce rapport, tout-à-fait concluante : une plaque d'argent fut iodée et exposée dessus aux vapeurs du chlorure d'iode ; par là, sa surface était devenue très-sensible à la lumière : je la plaçai dans la chambre obscure derrière un verre d'un rouge très-vif, et la dirigeai vers des maisons éclairées par le soleil. Après trois jours, la plaque montrait une image négative ; mais elle était si peu développée, si faible, que sans verre rouge, et sous l'influence des rayons violets ou bleus, on l'aurait obtenue dans trois minutes. J'ai déjà prouvé que les rayons rouges exerçaient une action tout aussi faible sur l'argent pur.

« 3° Une petite chambre obscure, munie d'une lentille de 15 millimètres seulement d'ouverture, fut dirigée vers la lune, et l'on plaça au foyer une plaque iodée, rendue plus impressionnable par le chlorure d'iode. Après le passage de l'astre, la plaque fut exposée comme à l'ordinaire à l'action des vapeurs de mercure, qui firent apparaître une bonne image de la course de la lune. L'expérience a été répétée par divers temps, lorsque la lune était pleine, croissante ou décroissante ; le succès a toujours été le même. Et cependant on ne peut pas ici songer cette fois à la chaleur comme cause de l'effet produit.

« 4° L'action de la lumière sur tous les corps offre une particularité qui n'a point d'analogue dans l'action de la chaleur. Celle-ci agit toujours de la même manière ; si son action se continue, elle ne fera que rendre plus intense l'effet qu'elle avait d'abord produit ; elle a

commencé par dilater, elle ira dilatant toujours. La lumière, au contraire, n'agit pas d'une manière uniforme; son action parcourt certaines phases qu'il est surtout facile d'étudier sur l'iodure d'argent. Dans la chambre obscure, l'iodure reçoit d'abord une image négative, comme on le sait depuis longtemps; sous l'influence continuée de la lumière, cette image, comme je crois l'avoir observé le premier, fait place à une image positive. Mais là ne s'arrête pas encore l'action de la lumière; j'avais dit qu'il était très-vraisemblable qu'à ces deux images en succédaient d'autres, et, en effet, j'ai *quelquefois* vu dans ces derniers temps la troisième image qui était négative, j'espère voir la quatrième qui doit être positive.

» Le fait remarquable observé par M. Rauch est une conséquence nécessaire de cette action non interrompue de la lumière : une gravure qui, pendant quatorze ans, avait été recouverte par une glace, mais sans être remuée, avait produit sur la glace une image de teinte blanchâtre. On a vu de semblables images fort distinctes se former souvent sur la surface intérieure des boîtes de montre, sans le concours de la vapeur ou de tout autre secours étranger. L'action des rayons invisibles fait apparaître, après quelques jours, ces mêmes images sur beaucoup de métaux, l'argent, le cuivre, le laiton, le zinc ou l'or, sur le verre et la porcelaine. Les rayons de lumière ordinaire produisent le même effet, mais seulement quant ils sont très-intenses.

» La présence de ces images sur des corps si peu susceptibles d'éprouver des modifications chimiques prouve assez par elle-même que l'action de la lumière est d'une nature toute particulière, et qu'on ne peut l'assimiler à l'action de la chaleur. Ajoutons encore que les images dont nous venons de parler s'effacent très-facilement.

» 5° Une nouvelle série de faits tout-à-fait imprévus et que j'ai récemment observés, combat encore efficacement cette prétendue identité de la lumière et de la chaleur. Je remarquai, par hasard, qu'une plaque d'argent pouvait être iodée, alors même qu'elle était imbibée d'huile. Cette observation me conduisit à rechercher si l'action des vapeurs de mercure serait sensible à travers cette même couche d'huile. Une image qui était restée le temps nécessaire dans la chambre obscure fut mouillée d'huile et exposée aux vapeurs de mercure. Le résultat de cette opération fut une très-bonne image de la nature

de celles qu'on obtient communément. Il y a là sans doute quelque chose de surprenant ; mais, ce qui excitera davantage l'attention, c'est que l'image obtenue était plus riche de détails que celles qu'on obtient par le procédé ordinaire. Je répétai cette expérience, mais en ayant soin de ne recouvrir d'huile que la moitié de la plaque. Lorsque je l'eus exposée aux vapeurs de mercure, la partie qui n'était pas huilée donna une bonne image positive, la partie huilée montrait une image négative : sur cette portion de la plaque, l'image avait donc plus progressé. Je puis ajouter que l'emploi de l'huile réduit à la moitié, ou du moins aux trois quarts, le temps pendant lequel la plaque doit rester dans la chambre obscure.

» Je ne sais à quoi comparer cette action de l'huile ; ce n'est pas, comme on pourrait le croire, à l'action des verres jaunes ou rouges ; car, si l'on applique l'huile immédiatement après l'ioduration, le temps du séjour dans la chambre obscure peut être réduit d'un cinquième ou d'un quart : or, cette réduction ne peut être obtenue par l'influence d'aucune couleur. J'ai fait les mêmes expériences avec de l'huile de navette, de baleine, de térébenthine, de pieds de bœufs ou de moutons, de naphte, et j'ai toujours obtenu les mêmes résultats. Je me suis assuré aussi qu'on hâtait par l'emploi de ces fluides le double effet de la lumière, le noircissement de l'iodure, et son retour subséquent à la couleur ordinaire.

» Après que j'eus ainsi découvert l'heureuse influence des huiles, je répétai avec leur secours l'expérience que j'avais déjà faite sur la lune. L'image que j'obtins était négative ; ce qui provenait, sans aucun doute, de ce que, dans cette circonstance nouvelle, les rayons de la lune avaient agi trop efficacement. Si l'on se rappelle actuellement que, d'après les expériences de M. Melloni, les huiles transmettent faiblement l'action de la chaleur, il faudra nécessairement conclure des faits cités que l'effet produit par la lumière sur la plaque iodée ne doit pas être attribué à l'action de la chaleur ordinairement unie à la lumière.

» 6° Je pourrais enfin faire observer qu'il n'est aucun effet produit par la chaleur sur l'iodure d'argent, que l'on puisse identifier ou même comparer avec les effets produits par la lumière. La lumière noircit l'iodure jaune, et le ramène ensuite à sa couleur première ; la chaleur, qu'il soit noirci ou coloré, lui donne toujours un aspect lai-



teux. Dans cet état, il est très-peu impressionnable par la lumière, l'action du soleil se borne à faire prendre lentement une teinte grisâtre. »

A force de faire retentir à nos oreilles avec un sang-froid imperturbable ce mot séduisant, quoique bizarre, de lumière latente, M. Moser finirait par nous faire adopter son opinion, quelque étrange qu'elle soit. Il est temps de faire apparaître la vérité pour mieux nous défendre des mille idées confuses qui se présentent à l'esprit. Nous le ferons en reproduisant ici un beau mémoire qui a suffi à placer son auteur au premier rang des physiciens : la lecture du travail de M. Waidele, que nous avons traduit avec le plus grand soin, frappe vivement ; on sent que là est le vrai. La découverte de la condensation des vapeurs à la surface des corps et des effets produits par cette condensation, est pleine d'avenir ; c'est un nouveau champ ouvert à des études éminemment intéressantes. Si nous avions à prononcer entre la valeur relative des mémoires de Moser et de son jeune antagoniste, nous serions fort embarrassés ; il y a plus d'éclat et de bonheur dans les recherches de M. Moser, plus de vrai mérite et de perspicacité dans celles de M. Waidele. Le nom du professeur de Kœnigsberg sera plus populaire, plus immortel, si l'on peut s'exprimer ainsi ; à tout prendre, cependant, nous aimerions mieux peut-être avoir écrit la critique que la dissertation primitive.

Expériences et observations sur la lumière invisible du professeur Moser ; par le docteur Erwin Waidele, de Vienne. (*Annales de physique et de chimie de Poggendorff*, t. lix, p. 255.) — « Si les découvertes de M. Moser excitent actuellement dans le monde scientifique une surprise et un intérêt universels, elles doivent avoir un intérêt et une importance encore bien plus grande pour ceux qui, depuis longtemps, s'occupaient du même objet. Si, pour cette raison, les expériences de Moser parurent très-surprenantes et presque incroyables à un grand nombre de personnes, elles produisirent en moi ces effets à un degré bien moindre, parce que le fondement théorique des procédés de Daguerre formait depuis longtemps le sujet de mes investigations, et que, partant, un grand nombre de phénomènes que M. Moser mentionna dans la série de ses expériences m'étaient déjà connus par mes propres recherches, bien que sous une autre forme, et souvent avec une explication tout-à-fait différente.

» Je n'ai nullement l'intention d'essayer dans les lignes qui vont suivre une critique des expériences de M. Moser ; au contraire, je me bornerai à expliquer les phénomènes que M. Moser présente comme des effets d'une lumière invisible, à l'aide de quelques lois depuis longtemps connues, et qui rendent tout-à-fait superflu de recourir à l'hypothèse d'une lumière invisible et de rayons latents.

» La théorie des effets de la lumière, telle que M. Moser la présente, repose sur les assertions suivantes :

» 1° Le contact des corps, la condensation des vapeurs et la lumière produisent dans tous les corps une même modification ; la modification qui est produite par le contact, ou par la condensation des vapeurs, n'est donc aussi qu'un effet de la lumière, alors même que celle-ci ne serait pas perceptible pour notre œil.

» 2° De même qu'un effet (un dégagement) de lumière a lieu dans la condensation des vapeurs, on peut semblablement mettre en évidence dans l'évaporation un effet (une absorption) de lumière. Les vapeurs retiennent donc de la lumière à l'état latent, et il y a par conséquent une lumière latente, comme il y a un calorique latent.

» Je me propose maintenant d'établir dans les lignes suivantes que :

» 1° L'altération qui est produite sur les corps par leur contact, bien qu'elle ait dans quelque cas, avec l'effet de la lumière, une ressemblance trompeuse, s'explique cependant d'une manière beaucoup plus simple par des lois de la nature tout-à-fait différentes ; ensuite :

» 2° Que la condensation des vapeurs produit essentiellement les mêmes altérations sur les corps que le contact, et que, partant, ces altérations aussi sont distinctes des effets de lumière, et enfin :

» 3° Que le passage de la lumière à l'état latent ne peut nullement être établi, si les altérations produites par le contact et la condensation des vapeurs ne sont point des effets de la lumière.

» Il me semble que je ne puis suivre de meilleure méthode pour développer mon opinion que de procéder par voie historique ; j'arriverai plus infailliblement à faire partager au lecteur ma conviction, en suivant la marche même qui m'y a conduit.

» Lorsque, il y a environ un an, je m'occupais d'une appréciation plus exacte des diverses méthodes qui avaient été proposées par différentes personnes pour la préparation la plus parfaite des plaques de Daguerre, je fis l'observation que la préparation achevée, ces pla-



ques, également polies et également nettes, se trouvaient souvent dans des états très-différents, et que ces états exerçaient une influence très-essentielle sur les opérations auxquelles on devait les soumettre encore dans le procédé de M. Daguerre.

» La cause de ces états des plaques se trouve principalement dans la qualité des matières employées au nettoyage; car une pureté et une sécheresse parfaites, un certain dégré de ténacité et une grosseur uniforme dans les grains ne sont pas les seules qualités qu'on doive exiger d'une bonne poudre à nettoyer. Bornons-nous, par *exemple*, à observer certains phénomènes que nous présente le tripoli. Il attire avec une grande avidité l'humidité de l'atmosphère, et il faut, par conséquent, le faire sécher à plusieurs reprises s'il doit pouvoir servir avec avantage à la préparation des plaques de Daguerre. On y réussit le mieux par une légère calcination. Le tripoli récemment calciné est alors une excellente poudre à nettoyer; car, si la plaque, après avoir été polie et nettoyée, est frottée de nouveau avec du tripoli parfaitement sec, celui-ci lui enlève toute humidité, et lui donne en même temps un beau poli.

» Mais si on laisse séjourner à l'air, pendant quelques jours seulement, le tripoli calciné, la plaque qu'il aura servi à polir sera constituée dans un état tout autre que si l'on avait fait usage de tripoli récemment calciné. On s'expliquait cette circonstance en admettant que le tripoli était devenu humide à l'air; mais la même altération se manifestait aussi après l'emploi du tripoli qui avait été conservé dans un air préalablement desséché : l'humidité ne pouvait donc pas en être la cause unique.

» Ces différents états dans lesquels une plaque, préparée d'abord de la même manière, se trouve constituée par les différentes espèces de tripoli, ne peuvent cependant s'apercevoir qu'après une insufflation faite sur la plaque.

» Et, en effet, la plaque qui a été polie avec du tripoli récemment calciné montrait, après l'insufflation, une belle coloration bleue de la vapeur d'eau condensée, tandis que celle qui avait été polie pendant quelque temps avec du tripoli exposé d'abord à l'air, montrait, après l'insufflation, une coloration brunâtre due à la vapeur.

» Mais ce phénomène énigmatique s'explique si l'on se souvient que le tripoli absorbe les gaz avec beaucoup d'avidité.

» On a déjà démontré cette propriété pour presque tous les corps solides et liquides. Non-seulement les métaux et le charbon, à l'état de division extrême de leurs particules, le possèdent au degré le plus remarquable, mais on démontre encore assez clairement qu'elle existe pour des métaux solides, ou dans lesquels la cohésion s'exerce encore à un assez haut degré, comme, par exemple, pour des plaques polies.

» Cependant, avant d'employer cette propriété des corps pour l'explication des différences ci-dessus mentionnées, qu'il me soit permis de rappeler quelques propositions sur l'absorption des gaz, afin d'en déduire pour l'examen ultérieur de ces phénomènes une manière plus facile de se les représenter.

» On a trouvé, comme on sait, par l'expérience que chaque corps possède un pouvoir absorbant différent pour différents gaz. Comme ce pouvoir diminue la force élastique des gaz, un gaz possède une densité d'autant plus grande que le pouvoir absorbant du corps qui y est plongé est plus considérable, et qu'il en a déjà absorbé en plus grande proportion.

» Mais les gaz absorbés sont aussi constamment en équilibre avec l'espèce d'air qui entoure le corps absorbant, et un corps absorbe d'autant plus vite une quantité donnée de gaz que le milieu ambiant est plus dense et plus chargé de ce gaz.

» La condensation des gaz absorbés par les corps solides ne se fait cependant toujours qu'à leur surface ; plus, par conséquent, la surface d'un corps est grande, plus il peut absorber de gaz.

» Pour donner à ces propositions une forme sensible, on peut se représenter un corps solide qui a absorbé une espèce de gaz, comme s'il était entouré d'une couche de gaz condensé, couche qui devient d'autant plus dense qu'elle s'approche davantage de la surface du corps, ou, en d'autres termes, le gaz absorbé forme autour de la surface du corps une atmosphère, comme l'air atmosphérique autour du globe terrestre.

» Qu'on veuille donc, si je parle plus loin de l'atmosphère d'un corps, ne donner à cette expression qu'un sens conforme à la manière de se représenter les faits que je viens d'indiquer.

» Nous avons vu précédemment que, dans la préparation des plaques de Daguerre, les vapeurs d'eau se condensent sur une plaque

bien préparée avec une coloration autre que sur une plaque qui a été polie avec des matériaux impurs, comme, par exemple, avec de la poudre de tripoli humide ou chargée de gaz absorbé. La coloration des vapeurs d'eau condensées nous sert donc de critérium pour la pureté des plaques de Daguerre, et qu'il me suffise de faire observer que si, dans la suite, je parle de plaques préparées, j'entends toujours désigner des plaques préparées avec tous les soins possibles, et qui présentent le critérium de pureté mentionné.

» Les divers états dans lesquels les plaques de Daguerre *peuvent* être constituées par la qualité différente des poudres à nettoyer n'ont essentiellement leur cause que dans l'absorption des gaz. C'est ce que les expériences suivantes ont pour but d'établir.

» *a.* Une plaque préparée avec du tripoli récemment calciné, et qui, après l'insufflation, montre une coloration bleue au souffle, est conservée pendant quelques heures sous une cloche de verre préalablement desséchée. Cette plaque ne montre plus alors, après l'insufflation, comme précédemment, la coloration bleue ; mais elle tire déjà sur le brun, et, après un temps plus long, elle montre enfin une couleur tout-à-fait brune de la vapeur d'eau condensée.

» *b.* Si l'on prépare une seconde plaque aussi parfaitement que la première, et qu'on la saupoudre fortement de poudre de tripoli, si cette poudre de tripoli a été longtemps exposée au contact de l'air sans avoir été récemment calcinée, la plaque sera, après peu de minutes, sous l'action du tripoli, précisément dans le même état où la plaque précédente avait été amenée par l'action de l'air atmosphérique prolongée pendant plusieurs heures ; car elle ne montre plus, après l'insufflation, la couleur bleue, mais déjà la couleur brune dont j'ai parlé tout à l'heure.

» Ce phénomène s'explique très-facilement si l'on songe que chaque grain de poussière de tripoli est entouré d'une atmosphère de gaz absorbé, et que, partant, la plaque ne se trouvait plus dans l'air atmosphérique, mais dans l'atmosphère de la poudre de tripoli, c'est-à-dire dans un milieu beaucoup plus dense ; d'où il résulte qu'elle absorbait dans quelques minutes autant et plus de gaz que dans l'air atmosphérique pendant quelques heures.

» Les diverses colorations du souffle sur les plaques préparées apparaissent bien plus rapidement et d'une manière plus prononcée, si,

au lieu du tripoli, on choisit des substances qui possèdent au plus haut degré le pouvoir d'absorber les gaz, comme, par exemple, le charbon et les métaux à l'état de division extrême.

» Un moyen très-commode de délivrer ces substances du gaz déjà absorbé, c'est la calcination.

» *Première expérience.*—On calcine fortement une petite quantité de poudre de charbon dans un creuset de platine fermé, et on la dépose ensuite sur une plaque froide de fer, pour hâter le refroidissement. Une seconde portion de la poudre de charbon a déjà été calcinée une heure auparavant, et, immédiatement après, on y a fait passer un courant d'acide carbonique desséché. Aussitôt que la première portion est refroidie, la moitié d'une plaque préparée est fortement saupoudrée avec la poudre de charbon récemment calcinée, tandis qu'on recouvre l'autre moitié d'une feuille de papier. On recouvre ensuite de cette feuille de papier la moitié déjà saupoudrée de la plaque, et on répand sur l'autre moitié la poudre de charbon saturée d'acide carbonique. Après une ou deux minutes, on balaie rapidement de la plaque, avec du coton pur, toute la poudre de charbon, et, après l'insufflation, la plaque présente encore, sur la moitié qui avait été recouverte de la poudre de charbon pure, une coloration bleue; tandis que la moitié qui avait été couverte de la poudre de charbon chargée d'acide carbonique fait paraître une coloration brune de la vapeur d'eau. Comme les deux états se présentent l'un à côté de l'autre sur la même plaque, les diverses nuances se délimitent l'une l'autre, et ressortent ainsi d'une manière plus distincte.

» Si l'on expose cette plaque aux vapeurs du mercure, elles ne se ondensent d'une manière appréciable que sur la moitié où s'était rouvée la poudre de charbon récemment calciné.

» Nous voyons par là que les plaques préparées condensent les va- eurs en moindre proportion dans les endroits où elles ont absorbé es gaz que là où elles sont parfaitement pures, et par là s'explique ussi la diverse coloration de la vapeur d'eau condensée après l'in- ufflation.

» Nous avons aussi appris à connaître par cette expérience un moyen e pourvoir en peu de temps, et par un procédé simple, des plaques étalliques pures d'une atmosphère de gaz absorbé. Et, en effet,



si l'on fait absorber une espèce de gaz par de la poudre de charbon récemment calcinée, et qu'on en saupoudre une plaque métallique pure, celle-ci absorbera une partie du gaz renfermé dans la poudre de charbon. Cette absorption se fera pendant un temps plus ou moins court, suivant que la métal possède pour le gaz employé un pouvoir absorbant plus ou moins grand.

» *Deuxième expérience.* — Si, par le procédé qu'on vient d'indiquer, on donne à une plaque une atmosphère d'acide carbonique ou de gaz ammoniac, et qu'on souffle sur la plaque après avoir enlevé le charbon, elle montre une coloration brunâtre bien marquée. Si maintenant on pose sur cette plaque un petit disque, mince, de charbon de buis qu'on a d'abord fortement calciné (mais ensuite laissé refroidir), et qu'après quelques secondes on enlève le disque de la plaque, l'insufflation fera paraître l'image du disque, et, si le disque a séjourné sur la plaque pendant un temps suffisant, le souffle produira à cet endroit une belle coloration bleue, comme sur une plaque récemment préparée.

» *Troisième expérience.* — Si l'on pourvoit une plaque d'une atmosphère d'hydrogène, et qu'avec un morceau d'éponge de platine qu'on y promène légèrement on y dessine différents traits, toute la trace qui aura été parcourue par l'éponge de platine se présentera, après l'insufflation, avec une coloration bleue sur un fond brun; et, en exposant la plaque aux vapeurs de mercure, elles ne se condenseront aussi que sur la trace laissée par l'éponge de platine.

» Ces expériences font voir bien nettement comment on peut enlever à une plaque son atmosphère de gaz absorbé en appelant un corps qui absorbe les gaz avec beaucoup d'avidité, et comment la condensation des vapeurs est modifiée d'une manière correspondante par l'absorption des gaz.

» Les lecteurs qui sont déjà familiarisés avec les expériences de M. Moser auront déjà remarqué que les expériences qu'on vient de mentionner ne sont que des modifications de celles de Moser, mais que ces modifications se présentent avec d'autant plus de netteté et d'énergie que les corps choisis pour les produire possèdent d'une manière plus marquée le pouvoir d'absorber les gaz. Si, partant, on voulait expliquer toutes les expériences, non par les lois de l'ab-

sorption, mais par les effets d'une lumière invisible, il n'en faudrait pas moins accorder que tous les moyens par lesquels l'absorption des gaz est facilitée ou empêchée exercent sur les effets de la lumière invisible une influence très-essentielle. M. Moser dit expressément qu'il ne pouvait jamais découvrir une loi certaine qui réglât les modifications produites par la lumière invisible dans la condensation des vapeurs, par la raison que cette condensation était plus forte, tantôt aux endroits où le contact des corps avait eu lieu, et tantôt aux endroits opposés.

» Il ressort déjà très-clairement de mes expériences précédentes, et j'espère pouvoir le confirmer d'une manière encore plus frappante dans les lignes qui vont suivre, que cette irrégularité apparente peut être ramenée à une loi complétement définie si l'on essaye d'expliquer les expériences de Moser, non, par les effets d'une lumière invisible, mais par *l'action des atmosphères des corps* et *l'absorption des gaz*. Les expériences suivantes feront voir en même temps de combien d'hypothèses auxiliaires on a besoin, pour peu qu'on poursuive dans leurs détails les expériences sur la lumière invisible; tandis qu'au contraire les modifications qu'elles présentent peuvent déjà se préciser d'avance dans ma manière de voir. L'une des expériences les plus simples que M. Moser fasse avec la lumière invisible est la suivante.

» Sur une plaque d'argent nettement polie, on place, pendant quelques minutes, un poinçon d'acier gravé; puis on l'enlève et on expose la plaque aux effets des vapeurs. Celles-ci font apparaître l'image du poinçon en se condensant *plus fortement* sur les endroits de la plaque touchés par le poinçon que partout ailleurs, ou réciproquement.

» D'après les observations précédentes sur les diverses modifications que les plaques présentent dans leur préparation, on peut admettre que la plaque préparée pour cette expérience peut-être ou parfaitement pure, ou chargée d'une atmosphère de gaz absorbé; bien plus, si l'on n'apporte pas un grand soin dans la préparation des plaques, ce n'est qu'un hasard si, avec des matériaux de nettoyage qui ne sont pas tout-à-fait excellents, on obtient une plaque pure de gaz absorbé; circonstance dont malheureusement je n'ai que trop souvent fait l'expérience dans mes premiers essais de da-



guerréotypie. De même aussi le poinçon dont on veut obtenir l'image pourra être pur de gaz absorbé ou ne pas l'être.

» Or, j'ai expliqué dans ce qui précède par quels procédés on peut délivrer une plaque métallique de gaz absorbés, et comment, au contraire, on peut la pourvoir d'une atmosphère d'un gaz choisi à volonté.

» On peut faire à volonté la même chose sur le poinçon d'acier ; on peut, en le chauffant ou en le nettoyant avec une poudre et de l'alcool à l'aide d'une brosse, le délivrer des gaz absorbés, mais on peut aussi, en le laissant séjourner longtemps à l'air, ou dans de la poudre de charbon qui a absorbé un gaz quelconque, le pourvoir d'une atmosphère de gaz absorbés.

» Les expériences suivantes pourront montrer quels sont les résultats que, dans l'expérience fondamentale de M. Moser, on obtient à l'aide de ces modifications.

» *Quatrième expérience.* — Sur une plaque préparée on posa un poinçon d'acier aplati qui avait séjourné pendant longtemps dans de la poudre de charbon saturée d'acide carbonique. Après dix minutes, le poinçon fut enlevé et la plaque exposée aux vapeurs de mercure. Le mercure ne se condensa qu'aux endroits qui n'avaient pas été en contact immédiat avec le poinçon, c'est-à-dire aux endroits de la plaque qui se trouvaient vis-à-vis des parties gravées du poinçon.

» *Cinquième expérience.* — Une plaque fut polie avec du tripoli qui avait séjourné à l'air, jusqu'à ce qu'elle présentât, après l'insufflation, une coloration brunâtre. Le poinçon d'acier fut purifié de tous les gaz absorbés en le chauffant, en le nettoyant avec du tripoli et de l'alcool à l'aide d'une brosse, et en le desséchant ensuite avec du tripoli récemment calciné ; puis, on le plaça à l'instant même sur la plaque. Il en fut enlevé après une demi-heure, et la plaque exposée aux vapeurs de mercure. Il se forma, par leur action, une image du poinçon. Mais cet image présentait une disposition inverse de celle qui avait eu lieu dans la première expérience ; les vapeurs s'étant condensées maintenant plus fortement aux endroits où le contact avait eu lieu qu'à ceux qui correspondaient aux creux de la gravure.

» La réussite de cette expérience est encore beaucoup plus frappante, si, au lieu de préparer la plaque pure avec du tripoli qui a

séjourné à l'air, on la couvre d'une couche de poudre de charbon qui a absorbé un gaz quelconque, si on la laisse pendant quelques minutes dans cet état, qu'on en balaye ensuite la poudre de charbon avec du coton, et qu'on y pose à l'instant même le poinçon nettoyé.

» *Sixième expérience.* — Sur une plaque préparée bien pure, on posa un poinçon nettoyé avec le même soin ; après avoir laissé passer une heure, on exposa la plaque aux vapeurs de mercure. Les vapeurs se condensèrent sur cette plaque avec tant d'uniformité, qu'on ne vit apparaître que très-faiblement, en forme de disque, l'espace que le poinçon d'acier avait occupé, mais sans que la gravure du poinçon se fût dessinée le moins du monde.

» *Septième expérience.* — Une plaque préparée fut pourvue d'une atmosphère d'acide carbonique à l'aide d'une poussière de charbon chargée de ce gaz, et qu'on y avait répandue ; le poinçon fut de même placé dans de la poussière de charbon pareille ; ensuite les deux pièces furent soigneusement nettoyées de la poussière de charbon adhérente, à l'aide du coton pur, et le poinçon fut placé sur la plaque. Après une action d'une heure, la plaque, après avoir été exposée aux vapeurs du mercure, ne montra aucune trace d'image.

» De ces expériences, il résulte clairement que, dans le cas où la plaque et le poinçon se trouvaient, par rapport aux gaz absorbés, dans des états opposés, l'influence réciproque fut la plus rapide et la plus énergique ; tandis que lorsque les deux corps se trouvaient dans le même état, leur influence mutuelle était presque nulle. L'altération visiblement très-faible, si par hasard elle existait dans ces conditions, comme dans la troisième expérience (1), doit plutôt être attribuée à l'influence de l'air atmosphérique, vu qu'elle n'avait lieu que là où la plaque, non entièrement couverte par le poinçon, pouvait se procurer dans l'air atmosphérique une atmosphère, quoique très-faible, de gaz absorbés.

» Si, dans ces expériences, on voulait regarder comme efficace la « lumière invisible », on tomberait dans un embarras considérable, puisqu'il faudrait lui attribuer, pour l'explication suffisante de ces

(1) Il est question de l'expérience qui, dans la série complète, est intitulée : « *Sixième expérience.* »

expériences, une foule de propriétés. Il faudrait admettre, par exemple, que l'on peut ôter à un corps son pouvoir lumineux à l'aide de poussière de charbon récemment calcinée ; et que l'on peut augmenter la lumière invisible d'un corps à l'aide de poussière de charbon qui a absorbé quelque gaz, ou réciproquement ; puis, qu'en nettoyant les corps avec une poudre propre à cet usage, leur pouvoir lumineux change, etc.

» Que si, au contraire, on regarde l'influence réciproque des gaz absorbés comme la cause fondamentale des phénomènes ci-dessus mentionnés, tous les changements qui avaient lieu dans ces expériences s'expliquent non-seulement avec une très-grande facilité, mais peuvent même, dans beaucoup de cas, se déterminer d'avance.

» L'expérience suivante confirme encore davantage cette opinion. Un poinçon d'acier qui avait déjà séjourné pendant quelques heures dans de la poussière de charbon saturée d'acide carbonique, fut rapidement placé sur une plaque fraîchement préparée, et fut transporté après une demi-heure sur une seconde plaque qui avait été préparée pendant ce temps, en même temps que la première plaque était exposée aux vapeurs de mercure. De cette manière, le même poinçon fut posé sur six plaques, et on le laissa séjourner une demi-heure sur les deux premières plaques, une heure sur la troisième et la quatrième, et deux heures complètes sur la cinquième et la sixième.

» Les trois premières plaques seulement montrèrent, à l'aide des vapeurs de mercure, l'image du poinçon d'acier, et cela avec une intensité décroissante ; car la première image était la plus forte de toutes, et, sur la quatrième plaque, on ne pouvait plus apercevoir une faible trace d'image qu'à l'aide de l'insufflation.

» Or, cette expérience s'explique facilement d'après les lois de l'absorption ; cela n'a plus lieu si l'on veut attribuer cet effet à la *lumière invisible* ; car il faudrait alors admettre, ensuite de cette expérience, que chaque corps ne possède qu'une certaine quantité de pouvoir lumineux invisible.

» Jusqu'ici je me suis borné à expliquer les expériences de M. Moser sur la lumière invisible, dans leur forme la plus simple, par l'action des atmosphères des corps ; mais les expériences plus compliquées avec des plaques d'argent iodurées s'expliquent avec la même facilité,

pourvu qu'on observe, comme je vais bientôt le montrer, quel est l'effet que les vapeurs d'iode exercent dans des circonstances différentes sur des plaques d'argent.

» Mais avant tout, je tracerai encore, entre l'effet de la lumière visible et de l'invisible, un court parallèle, duquel il ressort clairement que les altérations produites par le contact d'un objet avec une plaque d'argent iodurée diffèrent essentiellement de celles que produit sur la plaque iodurée l'effet de la lumière, dans la chambre obscure.

» Une plaque d'argent iodurée est exposée aux effets de la lumière invisible; on y place, par exemple, un poinçon, une pièce de monnaie; l'image du poinçon d'acier s'y forme après quelque temps, et elle peut être produite par les vapeur de l'eau, de l'iode et du mercure.

» Une autre plaque d'argent iodurée est exposée, dans la chambre obscure, à l'influence de la lumière pendant le temps nécessaire à la production d'une image daguerrienne. Mais cette image n'apparaît que par les vapeurs de mercure; car, par la condensation de la vapeur d'eau, il ne se montre aucune trace d'image; et par les vapeurs d'iode, l'effet de la lumière est même détruit entièrement.

» Que si, en poursuivant l'analogie, on attribue à la lumière une action chimique, de telle sorte qu'elle opère une décomposition réelle de l'iodure d'argent, la manière dont se comporte, en présence des vapeurs d'eau, d'iode et de mercure, une plaque d'argent qui a subi l'influence de la lumière, s'explique très-facilement ainsi qu'il suit :

» La combinaison de l'argent avec les vapeurs d'iode, qui s'est produite en iodurant la plaque, ne peut pas subsister sous l'influence de la lumière, et se décompose de façon que de l'argent métallique est séparé à l'état de poudre très-fine, et que l'iode forme avec l'argent restant une combinaison supérieure.

» Telle serait l'action de la lumière sur une plaque iodurée pendant la période daguerrienne; une action prolongée de la lumière occasionnera, en conséquence, une toute autre décomposition de l'iodure d'argent, parce qu'il se trouve à un état de combinaison tout autre que précédemment.

» La poussière séparée par le premier degré de l'influence de la lumière est de l'argent métallique; c'est ce qu'établit la manière dont elle se comporte avec la vapeur d'iode; car, si l'on expose derechef à la vapeur d'iode une plaque d'argent iodurée qui a subi l'action de



la lumière pendant la période daguerrienne, il se forme précisément la même combinaison que si l'on expose aux vapeurs d'iode une plaque d'argent pur, c'est-à-dire que la plaque iodurée derechef possède, pour l'influence de la lumière, la même sensibilité qu'elle possédait après la première ioduration.

» L'argent métallique réduit sur la plaque d'argent iodurée, par l'action de la lumière, se trouve à un état de division extrême, et possède, par conséquent, un grand pouvoir d'absorber les gaz. L'argent métallique, à l'état de division extrême, se comporte avec la vapeur d'eau de mercure comme beaucoup de sels avec la vapeur pour laquelle ils ont un grand pouvoir d'absorption.

» Mais on peut affaiblir et même anéantir ce pouvoir absorbant de l'argent métallique, à l'état de division extrême, en lui faisant absorber d'autres gaz. Lorsqu'il en est saturé, il possède, dans les mêmes circonstances, un pouvoir bien moindre d'absorber la vapeur de mercure, au point que celle-ci ne peut plus se condenser, de manière que cette condensation devienne visible sur la plaque.

» C'est par là que s'explique le phénomène par lequel M. Moser montre comment la lumière invisible peut *annuler* l'effet de la lumière visible ; car si l'on expose à l'action de la « *lumière invisible* » une plaque d'argent iodurée qui a éprouvé dans la chambre obscure l'action de la lumière autant que cela est nécessaire pour qu'il y ait production d'une image daguerrienne ; ou, en d'autres termes, si l'on pose sur cette plaque plusieurs objets qui doivent s'y dessiner, il arrive que dans les endroits où le contact a lieu, l'argent réduit se trouve dans l'atmosphère des gaz absorbés par ces objets, et qu'il y sera bientôt pourvu d'une atmosphère propre des gaz absorbés ; et si ensuite la plaque est exposée aux vapeurs de mercure, on aperçoit que l'argent réduit par la lumière, dans les endroits où il possède une atmosphère de gaz absorbés, a perdu en grande partie le pouvoir d'absorber la vapeur de mercure.

» Mais la même chose arrive aussi, quoique bien plus lentement, si, après l'action de la lumière, on conserve une plaque de Daguerre pendant plusieurs heures dans un endroit obscur, sans en approcher un objet quelconque ; car l'argent réduit absorbe dans l'air du gaz en proportion telle, que son pouvoir de condenser les vapeurs de mercure en est très-affaibli. Voilà pourquoi déjà Daguerre avait fait

l'observation qu'entre l'action de la lumière et celle du mercure il ne devait s'écouler que quatre heures au plus si l'on voulait encore obtenir une image distincte.

» Si l'on recouvre de poussière de charbon saturée d'acide carbonique ou d'ammoniaque une plaque iodurée qui a été exposée dans la chambre obscure à l'action de la lumière pendant le temps convenable, l'effet de la lumière est détruit presque instantanément, parce que l'argent réduit se pourvoit très-rapidement d'une atmosphère de gaz absorbés, et perd ainsi, avec une vitesse parallèle, le pouvoir de condenser des vapeurs de mercure. On voit par là que l'action de la lumière sur l'iodure d'argent est contrebalancée, ou plutôt détruite (nivelée d'après Moser) par des objets superposés (c'est-à-dire par la lumière invisible de Moser), d'autant plus vite que ces objets ont absorbé plus de gaz, et que le pouvoir absorbant de l'argent réduit par la lumière est plus grand selon l'espèce de gaz.

» Ceci est une nouvelle preuve de la justesse de l'opinion par laquelle j'ai montré comment tous les effets de la lumière invisible peuvent se ramener aux lois de l'absorption, lorsque l'on apprécie, sans opinion préconçue, les phénomènes qui sont attribués à cette cause cachée.

» Je crois avoir ainsi montré assez clairement que les modifications qui sont produites par le contact des corps ne sont aucunement identiques avec les modifications produites par l'action de la lumière, et que les premières s'expliquent bien mieux par les lois de l'absorption que par l'hypothèse de l'existence d'une lumière invisible admise par suite d'une analogie trompeuse ; mais la preuve la plus concluante en faveur de mon point de vue ne se trouverait-elle pas dans l'accord que les lois de l'absorption établissent entre les phénomènes de la condensation des vapeurs et ceux qui ont lieu dans le contact des corps ? Ce sujet formera la deuxième partie de mes recherches.

» II. Dans son premier mémoire, M. Moser montre avec beaucoup de sagacité comment l'effet de la lumière peut être imité par un emploi judicieux des vapeurs d'iode et de mercure. Mais, si l'on poursuit avec attention ces expériences, et si l'on se forme par son propre examen une conviction sur les phénomènes qui s'y passent, on verra certainement bientôt que la lumière et les vapeurs d'iode et de mercure produisent bien sur les plaques de Daguerre des phénomènes



très-semblables, mais que ces phénomènes se distinguent dans leur essence sous bien des rapports, et sont tout-à-fait insuffisants s'il s'agit de déduire de leur ressemblance une preuve de l'identité des effets de la vapeur et des effets de la lumière.

» Toutefois, si cette ressemblance n'a aucune valeur probante, elle n'en a pas moins été la base des expériences suivantes de M. Moser sur les phénomènes qui accompagnent la formation et la condensation des vapeurs ; et elle le conduisit à la conclusion suivante :

« Si les vapeurs agissent de la même manière que la *lumière*, il faudra, dans le cas où aucun effet de lumière n'a été visible, attribuer cependant à un effet de lumière, quoique invisible, les modifications qui ont accompagné la condensation des vapeurs.

« Cette lumière invisible se trouve, par conséquent, dans les vapeurs, dans un état combiné, comme *lumière latente ;* elle ne devient libre qu'au moment de la condensation des vapeurs, et elle produit alors les modifications qui peuvent aussi être produites par l'action de la lumière ordinaire. »

» Si cependant il se trouve dans les vapeurs une lumière latente qui, dans le passage des vapeurs de l'état gazeux à l'état d'agrégation liquide, se sépare de la même manière que cela a lieu pour la chaleur latente des vapeurs, il faut aussi que la lumière entre en combinaison dans la formation des vapeurs.

» C'est là ce que M. Moser fait voir également par quelques expériences (*Annales de Poggendorff*, t. LVI), et il croit avoir démontré suffisamment, avec leur aide, l'existence de la lumière latente. Mais si l'on considère ces expériences du point de vue qui forme le fondement de mon opinion sur l'essence de la lumière invisible, on reconnait à l'instant même que, par ces expériences, on ne peut pas plus établir la production de la lumière latente qu'on ne peut démontrer d'une manière semblable le dégagement de cette lumière dans la condensation des vapeurs.

» Au contraire, ces expériences ne font que donner un nouvel appui à mon opinion, vu que les phénomènes qui s'y produisent ne servent qu'à montrer avec quelle généralité et quelle rigueur les lois de l'absorption de gaz peuvent être constatées par des expériences semblables modifiées à l'infini.

» L'expérience la plus simple par laquelle on peut, d'après

M. Moser, démontrer que la lumière devient latente, est la suivante :

» Sur une plaque d'argent polie, une goutte d'eau, attachée à l'extrémité d'une baguette de verre, est promenée en différents sens, de telle façon que la goutte ne se répande pas sur la plaque, mais suive toujours la baguette de verre. D'après la manière de voir de M. Moser, cette goutte d'eau qui s'évapore continuellement aurait enlevé à la lumière invisible de la plaque la quantité nécessaire pour la formation des vapeurs qu'elle produit.

» Si maintenant on expose cette plaque aux actions des vapeurs, leur condensation différente fait apparaître tout le chemin suivi par la goutte d'eau ; et par là se trouverait démontré l'effet de lumière qui aurait eu lieu dans cette circonstance.

» Avant d'essayer une interprétation de cette expérience d'après ma théorie, qu'on veuille, avant toutes choses, réfléchir sur l'état dans lequel il faut constituer la plaque pour que la goutte d'eau qui s'évapore n'adhère pas sur la plaque métallique pure, au point qu'elle ne se laisse plus du tout traîner à travers la plaque sans y laisser derrière elle une trace mouillée.

» On trouve, alors, qu'une plaque tout-à-fait nette de gaz absorbés est la plus favorable à l'adhésion de l'eau ; la goutte s'étendra avec d'autant plus de facilité sur une pareille plaque qu'elle est plus pure sous ce rapport, tandis qu'une plaque qui possède une atmosphère de gaz absorbés ne manifeste qu'une très-faible attraction pour les gouttes d'eau qui s'y trouvent ; car on peut les y traîner comme une surface grasse sans qu'elles y laissent aucune trace.

» Cependant il se montre encore ici une différence remarquable qui dépend de la nature des gaz absorbés. Et, en effet, les gaz qui sont absorbés par l'eau en quantité considérable possèdent pour elle plus d'affinité, et la goutte d'eau forme sur une surface métallique saturée de pareils gaz un segment sphérique plus aplati que si le gaz n'est absorbable par l'eau qu'en petite quantité.

» Si, par conséquent, on polit et on nettoye une plaque d'argent avec une poudre à frotter tout-à-fait ordinaire, et qui n'a pas été calcinée précédemment, on remplit le mieux les conditions favorables à la réussite de l'expérience ; car alors la poudre à nettoyer communique à la plaque une atmosphère de gaz absorbés, tandis que si l'on préparait une plaque avec une poudre à nettoyer complétement pur-



gée par la calcination des gaz absorbés, la plaque deviendrait ainsi tellement nette que l'adhésion de la goutte d'eau y serait forte au point qu'on ne pourrait faire l'expérience qu'avec difficulté.

» Si maintenant une goutte d'eau pure est promenée suivant différentes lignes sur une plaque pourvue d'une atmosphère de gaz absorbés, un échange des atmosphères a lieu tout aussi bien que dans le contact avec un corps solide. La goutte d'eau communique à la plaque, là où elle la touche, un peu de vapeur d'eau, de même que l'atmosphère de la plaque est en grande partie absorbée par la goutte d'eau. On peut maintenant apercevoir sans peine qu'*il en résulte* un changement dans la condensation des vapeurs, produites, par exemple, par l'insufflation, et qu'alors le chemin parcouru par la goutte d'eau peut apparaître.

» Cette expérience ne pourrait servir à expliquer « le passage de la lumière à l'état latent » que si l'on pouvait déjà citer pour ce fait une autre preuve fondamentale. Mais pour en conclure que les phénomènes qui l'accompagnent ne peuvent être attribués qu'au passage de la lumière à l'état latent, cette expérience manque de toute valeur probante, indépendamment même de l'objection qu'on pourrait tirer de sa ressemblance avec les autres phénomènes de l'absorption des gaz. Il en est de même des phénomènes qui, dans la condensation des vapeurs, doivent accompagner, dans l'opinion de M. Moser, le dégagement de la lumière latente. Ces expériences, aussi bien que les précédentes, peuvent se ramener aux lois de l'absorption. Il en résulte qu'il n'est pas permis de regarder ces phénomènes comme des effets de la lumière invisible et latente, tant qu'on ne rencontrera point dans ces expériences des effets qui ne puissent plus s'expliquer par l'absorption des gaz, mais uniquement par un effet de lumière.

» J'ai mentionné au commencement de ce mémoire qu'on pouvait reconnaître par la couleur du souffle l'état de pureté d'une plaque. Cette couleur bleue, de laquelle je disais qu'elle pourrait servir de critérium pour la pureté d'une plaque, ne peut être obtenue dans toute sa beauté que par le traitement le plus soigné de la plaque, et par la pureté la plus scrupuleuse des matériaux employés pour la nettoyer.

M. Martin nous a appris comment on opère pour amener aussi

vite que possible une plaque à cet état de pureté et de perfection, et son procédé de nettoyage est sans contredit le plus parfait de tous (1). La meilleure preuve en est fournie par les images qu'il a obtenues par ce moyen, et qui doivent leur supériorité sur toutes celles qu'on a vues jusqu'ici uniquement à la perfection de son procédé de nettoyage.

» C'est une chose singulière que M. Martin, sans en soupçonner la véritable raison, se soit principalement appliqué, dans la préparation et la purification des matières employées au nettoyage, à les obtenir, non-seulement parfaitement pures, mais aussi débarrassées de gaz absorbés.

» Cependant, il faut que je fasse observer que, dans l'état humide, les plaques de Daguerre font aussi quelquefois apparaître une coloration bleuâtre par suite de l'insufflation ; mais si ensuite on les traite encore avec une poudre à nettoyer sèche, la belle coloration bleuâtre du souffle ne se montre que sur les plaques nettoyées avec des matériaux qui ont été d'abord purgés de gaz absorbés.

» Ainsi, si l'on prépare sans grands soins une plaque de Daguerre, elle sera finalement encore humide, ou bien elle possèdera déjà une atmosphère de gaz absorbés.

» Ce dernier cas se rencontre le plus fréquemment ; car, en enlevant les dernières traces d'humidité, la poudre à nettoyer lui communique toujours les gaz qu'elle a absorbés.

» Comme je l'ai déjà mentionné, la coloration du souffle indique seule l'état de la plaque ; mais il reste encore quelques difficultés dans l'explication de cette coloration diverse. Quoi qu'il en soit, il nous suffit de connaître ce fait, que la vapeur d'eau ne se condense sur une plaque pure avec une autre couleur que sur une plaque couverte d'une atmosphère de gaz condensés.

» Si maintenant, par le contact avec un corps, une atmosphère est communiquée à une plaque pure dans les endroits où le contact a eu lieu ; ou si, par l'approche ou le contact d'un corps solide ou liquide, on a enlevé dans les endroits touchés l'atmosphère d'une

(1) M. Martin nettoye avec de l'alcool, de l'eau distillée, des os de mouton préparés et une peau de chevreuil tendre, purifiée d'abord avec de l'éther sulfurique.



plaque qui en est pourvue, les vapeurs d'eau, dans l'insufflation de la plaque, se condenseront avec une autre coloration dans les endroits qui ont été touchés et dans ceux qui ne l'ont pas été, et cela fera apparaître l'image de l'objet.

» La même modification que l'on produit dans l'atmosphère d'une plaque en approchant un corps solide ou liquide, peut se produire tout aussi bien par un corps gazeux.

» L'expérience suivante de M. Moser le montre de la manière la plus simple. Sur une plaque préparée sans soin particulier, on place une feuille de papier avec une figure découpée, une étoile par exemple, puis on insuffle la plaque avec précaution, de manière que la vapeur d'eau ne puisse l'atteindre qu'aux endroits où le papier est découpé.

» Si, maintenant, on laisse le souffle s'évaporer, qu'on enlève le papier de la plaque et qu'on insuffle de nouveau toute la plaque, l'on produit par là l'image de l'étoile, parce que là où la vapeur d'eau a frappé deux fois la plaque, la vapeur d'eau condensée possède une autre coloration qu'aux autres endroits. D'après M. Moser, on aurait imité, par la première insufflation, l'effet de la lumière, et, par la seconde, l'effet des vapeurs du mercure.

» Mais il est réellement remarquable que ces expériences ne réussissent jamais dans leur perfection sur une plaque parfaitement pure, préparée avec beaucoup de soin d'après la méthode de M. Martin, tandis qu'elles se présentent le mieux sur une plaque qui a d'abord été pourvue d'une atmosphère de gaz acide carbonique ou ammoniac.

» Cette circonstance seule nous conduit déjà à admettre que les effets de l'absorption des gaz jouent un rôle principal dans ces phénomènes, et que, partant, ces modifications n'ont rien autre de commun avec les effets de la lumière, si ce n'est que les unes et les autres sont produites par des vapeurs sur des plaques polies.

» On a appris, par des expériences multipliées, que dans les corps qui absorbent une grande quantité de vapeur, comme, par exemple, le charbon, la vapeur d'eau déplace la plus grande partie des gaz absorbés. La même chose a lieu aussi dans l'expérience précédente. Dans la première insufflation, la vapeur d'eau chasse des endroits où elle pouvait rencontrer la plaque la plus grande partie des gaz absorbés, pour rester elle-même sur la plaque à l'état gazeux.

Dans la seconde insufflation, la vapeur d'eau rencontre dans les endroits qui n'ont pas été encore modifiés l'atmosphère des gaz absorbés, et, dans les autres endroits, l'atmosphère de la vapeur d'eau combinée avec une petite quantité de gaz absorbés. Par ces états différents de l'atmosphère de la plaque, il se produit aussi une modification dans la condensation de la vapeur, vu que la vapeur d'eau se condense subitement par le refroidissement rapide.

» Mais si, au lieu de la seconde insufflation, on expose pendant un temps plus long la plaque à des vapeurs d'eau d'une très-faible tension, l'effet de la première insufflation est peu à peu contrebalancé, et, par la plus forte insufflation, on ne peut plus produire aucune trace d'image.

» Les vapeurs de mercure agissent comme les vapeurs d'eau. Mais les vapeurs d'iode obéissent à une loi différente, comme on peut le prévoir déjà par la circonstance que l'iode entre immédiatement en combinaison chimique avec l'argent; car, si l'on expose pendant quelque temps aux vapeurs d'iode une partie d'une plaque, et puis la plaque entière, au moment où la plaque entière sera colorée en jaune, la partie exposée plus tôt aux vapeurs sera déjà devenue rouge ou bleue.

» Par conséquent, si l'on expose des plaques à des vapeurs d'iode d'une tension uniforme, le temps fournira la mesure de la quantité d'iodure d'argent qui se sera formée. On peut prouver de cette manière que l'atmosphère de gaz absorbés oppose un obstacle à l'action des vapeurs d'iode.

» Car si l'on pourvoit d'une atmosphère d'un gaz quelconque l'une des moitiés d'une plaque préparée parfaitement pure, et qu'on expose ensuite toute la plaque à l'action uniforme des vapeurs d'iode, la partie pure de la plaque se recouvrira beaucoup plus fortement d'iodure d'argent que la partie pourvue d'atmosphère.

» Il y a plus, la sensibilité de l'iodure d'argent formé est aussi modifiée, à égale coloration de la plaque, par l'atmosphère des gaz absorbés. On pourra l'observer facilement dans l'expérience suivante.

» Si l'on prépare avec le même soin trois plaques, et que l'on pourvoie l'une d'une atmosphère d'acide carbonique, l'autre d'une atmosphère d'hydrogène, en laissant parfaitement pure la troisième, qu'on iodure ensuite toutes trois jusqu'à une coloration égale jaune

d'or, et qu'on les expose à la même lumière l'une après l'autre dans la chambre obscure, il faudra laisser agir la lumière pendant des temps inégaux, si toutes les trois plaques doivent recevoir une image également bien marquée. Si, par exemple, dix minutes suffisent pour produire une image bien marquée sur la plaque pure, la plaque pourvue d'une atmosphère d'acide carbonique exigera vingt minutes, et, au contraire, la plaque pourvue d'hydrogène n'exigera que cinq minutes pour la production d'une image égale à la première.

» L'influence des gaz absorbés se montre aussi au même degré pendant l'action du mercure. Et, en effet, la vapeur de mercure, sans nuire à la beauté de l'image, agira avec d'autant plus d'énergie qu'une plaque préparée aura été plus pure. Au contraire, les plaques pourvues de gaz ne peuvent jamais recevoir dans la boîte à mercure la même énergie d'impression qu'une plaque pure.

» Que si, partant, la sensibilité de l'iodure d'argent est rehaussée par l'hydrogène, l'huile de térébenthine, l'huile de naphte ou la vapeur d'éther, on ne peut jamais employer ces moyens avec un grand succès, s'il s'agit en même temps d'obtenir des images d'une beauté supérieure.

» D'après cela, les gaz absorbés contrarient fortement toutes les opérations du daguerréotype, et je pense que, quand même je n'aurais pas réussi à ramener à l'absorption du gaz les phénomènes de la lumière invisible de M. Moser, la daguerréotypie n'en pourra pas moins retirer des résultats de mes expériences une utilité de quelque importance; car, puisqu'elles ont fourni l'explication de tant d'obstacles, jusqu'ici inconnus, au procédé de Daguerre; ces obstacles, leur cause étant enfin connue, pourront être levés plus facilement. Comme je me réserve de développer dans une autre occasion, avec plus de détail, cette influence des gaz absorbés sur les procédés de Daguerre, je passe maintenant au résumé des résultats auxquels m'ont conduit mes expériences sur la lumière invisible, et à leur comparaison avec les faits découverts par M. Moser.

» Si l'on approche un corps d'une plaque polie, la modification qui est ainsi produite dépend des états différents dans lesquels se trouvent et le corps et la plaque par rapport aux gaz absorbés. Ce n'est que lorsqu'il existe entre les deux une différence sous ce rapport qu'il se produit une influence réciproque; car il arrive, ou bien

qu'une atmosphère de gaz absorbés est communiquée à la plaque, ou bien qu'une partie de l'atmosphère déjà adhérente à la plaque est enlevée par le corps qui la touche, ou bien qu'il ne se fasse aux endroits du contact qu'un échange des différents gaz absorbés.

» Le même effet est produit par un liquide approché de la plaque, ou même par un corps gazeux qui rencontre la plaque en quelques endroits ; il en résulte toujours une modification dans l'atmosphère de la plaque.

» Mais cette modification ne devient visible que lorsque des vapeurs se condensent sur la plaque, la coloration des vapeurs condensées variant d'après l'état de son atmosphère.

» Comme c'est uniquement sur la ressemblance des effets produits par la lumière sur une plaque d'argent iodurée et la manière dont elle se comporte en présence des vapeurs de mercure avec les phénomènes qui se produisent par le contact d'une plaque avec un corps solide, liquide ou gazeux, que M. Moser a fondé sa conclusion : que ces derniers phénomènes devaient aussi être attribués à l'action d'une lumière, quoique invisible ; on est plus fondé à attribuer ces effets « de la lumière invisible » aux lois de l'équilibre des gaz absorbés, aussi longtemps du moins que tous les phénomènes de la « lumière invisible » trouveront leur explication dans ces lois, et que le lien de causalité entre les effets de la lumière visible et invisible se trouve expliqué et mis en harmonie avec ces lois.

» Maintenant M. Moser a trouvé lui-même que les rayons de lumière invisible ne se rencontrent ni dans la lumière directe du soleil, ni dans la lumière diffuse. Ensuite, on ne peut jamais opérer par les rayons invisibles une décomposition chimique analogue aux effets des rayons de lumière visibles, et quand même un effet semblable paraîtrait avoir lieu, on peut toujours le déduire plus aisément d'autres causes que d'une décomposition chimique.

» D'où il résulte aussi que M. Moser refuse aux effets de la lumière toute décomposition chimique, et cela dans le seul but de pouvoir mettre en harmonie la lumière visible avec l'invisible. Les modifications qui sont produites par la lumière invisible sur la plaque d'argent ressemblent bien à celles de la lumière visible ; mais il n'y a aucunement identité comme je l'ai montré précédemment.

» Enfin, la décomposition chimique par la lumière de l'iodure



d'argent est le seul cas dans lequel l'action de la lumière visible montre une ressemblance avec l'action de la lumière invisible, et cela n'a lieu que parce que l'argent métallique séparé de l'iodure d'argent a un pouvoir de condensation très-grand sur les vapeurs de mercure, tandis que tous les effets de la lumière invisible sont déterminés par les lois d'absorption des gaz.

» Enfin, tous les phénomènes de la lumière latente peuvent s'expliquer par les lois de l'équilibre des gaz absorbés, et quoique M. Moser ait brisé, par la force de son génie, les chaînes du préjugé pour faire concevoir l'existence de la lumière latente, la réalité de cette existence ne saurait être démontrée aussi longtemps que toutes les expériences destinées à la démontrer s'expliqueront suffisamment par la manière dont se comportent les gaz absorbés, ou par d'autres lois de la nature déjà connues.

» J'ai montré plus haut quelle est l'influence qu'exercent sur toutes les opérations du procédé de Daguerre les phénomènes de l'absorption des gaz, et comment elle sert à expliquer la liaison entre l'action de la lumière et la manière dont se comportent les gaz absorbés, et je crois avoir ainsi suffisamment indiqué le chemin qui pourra conduire à expliquer les expériences de M. Moser sur la lumière invisible par quelques lois déjà connues de la nature.

» Quoique j'aie bien des fois répété presque toutes les expériences de M. Moser, et qu'elles n'aient contribué qu'à me convaincre de plus en plus de la vraisemblance de mon opinion, je crois cependant devoir recommander les expériences de M. Moser, conjointement avec mon explication, comme méritant d'être reprises et répétées sans idées préconçues.

» Je le fais par la raison qu'en répétant les expériences de M. Moser, j'étais constamment dirigé par une même opinion fondamentale, et que, partant, je ne puis prétendre, pas plus que M. Moser, avoir observé sans opinion préconçue.

» En livrant ainsi à la publicité mon avis sur l'essence de la « lumière invisible, » je ne saurais mieux faire que d'abandonner la solution de cette question à une critique faite sans arrière-pensée, et au temps qui mûrit toutes choses. »

Ce mémoire est daté de Vienne, 22 novembre 1842 : déjà, le 7 de ce même mois, M. Fizeau combattait, dans une lettre écrite à

l'Académie, l'hypothèse de la lumière latente si légèrement énoncée par M. Moser. Notre jeune physicien était bien près de la vérité : il avait entrevu que la production des images supposait la présence d'une substance intermédiaire; et si sa mauvaise santé lui avait permis de continuer ses recherches, nous aimons à croire que, comme M. Waidele, il aurait découvert le rôle important des atmosphères gazeuses. Nous analyserons les deux notes de M. Fizeau, après que nous aurons rappelé quelques faits curieux anciennement observés, mais qui ne furent compris qu'après la découverte de M. Moser.

Confirmation de la découverte de M. Moser. — Les curieuses expériences de M. Moser étaient à peine connues en France, que déjà M. Bréguet les rattachait à un phénomène du même genre observé longtemps auparavant. Tout le monde sait que lorsqu'on ouvre le fond d'une montre, on aperçoit un second fond appelé la cuvette, sur laquelle est gravé le nom du fabricant : le second fond est très-près du premier : il y a entre eux l'épaisseur d'un dixième de millimètre tout au plus : or, M. Bréguet avait eu souvent l'occasion de voir sur le fond l'image renversée et très-distincte du nom gravé sur la cuvette. Dans des machines où des pièces se trouvaient être ainsi placées à de très-petites distances, il avait vu aussi quelquefois sur l'une d'elles la représentation de signes plus ou moins remarquables.

M. Bréguet avait trouvé ces faits fort curieux, il les avait même, dit-il, communiqués à quelques personnes; mais n'ayant pas eu le temps d'observer toutes les particularités du phénomène, il s'abstint de le publier, une brillante découverte lui a ainsi échappé.

Longtemps avant aussi, le célèbre mécanicien Oertling avait observé un fait analogue dans le travail du polissage des verres parallèles. La plaque supérieure en laiton, à laquelle on fixait les verres qu'il s'agissait de polir, au moyen d'une couche de ciment fondu, était sillonnée de creux annulaires. Eh bien, chose singulière, les verres ainsi travaillés se distinguaient quelquefois d'eux-mêmes par la présence de ces sillons circulaires : sur le plus grand nombre cependant, l'image des sillons n'apparaissait très-visible que lorsqu'on insufflait sur eux l'haleine, et alors les parties mises en contact avec le laiton apparaissaient obscures, les portions correspondantes aux creux étaient plus claires. En frottant ces verres ou les lavant avec de

l'alcool ou l'essence de térébenthine, on ne leur faisait pas perdre cette curieuse propriété, il fallait pour cela recourir à un nouveau polissage.

Voici quelque chose de plus étonnant encore. Le célèbre sculpteur, M. Rauch, a vu naître, sur l'intérieur d'une glace placée, pendant un grand nombre d'années, au devant d'une gravure de Raphaël, sans être cependant en contact avec elle, une représentation fidèle du dessin reproduit par la gravure. M. Moser s'est souvenu depuis d'avoir vu des images semblables sur de la porcelaine, mais *elles* n'avaient pas fixé son attention. Une série d'expériences et d'observations directes l'ont mis sur la voie du phénomène, qui est tellement connu des personnes qui encadrent les gravures, que toutes, à Kœnigsberg, en parlent comme d'une chose très-commune. Il trouva d'abord, dans ses premiers essais, qu'il ne faut pas heureusement un temps très-long pour produire ces images : elles se formaient sur une glace après deux jours, sans l'emploi d'aucune vapeur. La glace avait une teinte plus blanche dans la partie altérée par la radiation. L'image était assez distincte et facile à détruire par le frottement. Dans ces premières expériences, il y avait eu contact, il fallait opérer à distance. Une planche gravée fut placée neuf jours à 2 ou 3 dixièmes de ligne de la glace polie ; l'image fut aussi distincte qu'au contact immédiat. M. Moser a obtenu ces mêmes impressions sur le cuivre, le laiton, et même l'or, et cela en cinq jours. Elles étaient d'une grande finesse, mais faciles à détruire par le frottement. Ayant constaté déjà qu'il n'existe pas d'effets d'une certaine radiation qui ne puissent être produits par toutes les autres, M. Moser devait prévoir que les phénomènes seraient les mêmes s'il employait la lumière visible dans une intensité convenable : et il a réellement obtenu ces images, qu'il appelle images de Rauch, au moyen de la lumière solaire, sur cuivre, zinc, argent et laiton. Il fallait conclure aussi de là que si une plaque restait longtemps exposée au soleil, elle se couvrirait de rosée. M. Moser a donc exposé, pendant l'été, aux rayons du soleil, des plaques de métal et de verre couvertes d'écrans dans lesquels il avait fait des découpures ; et il a obtenu des images très-nettes représentant les découpures ou les parties enlevées de l'écran : ces images étaient entièrement semblables à celles qui s'étaient formées au devant des gravures. Dans cette expérience directe, la vapeur

de l'atmosphère s'était précipitée sur les plaques, quoiqu'elles ne fussent aucunement au-dessous de la température de l'air, condition requise pour la rosée ordinaire. La théorie de la rosée n'était donc pas complète ; on avait ignoré jusqu'ici le rôle que joue la lumière dans ce phénomène. La chaleur aussi favorise la formation des images et l'adhérence de l'humidité, et M. Moser a prouvé que l'élévation de température d'une plaque de laiton gravée au burin hâtait la production des images : la vapeur se condense très-rapidement sur la plaque polie, qui est en contact avec la plaque gravée, quoique cette dernière soit fortement échauffée. Le contact immédiat n'est, d'ailleurs, aucunement nécessaire, on peut séparer les deux plaques, celle qui donne de celle qui reçoit par l'interposition de lames de mica : l'action seulement sera plus lente et plus faible, la chaleur la favorisera : lorsqu'on échauffe trop après que l'image est déjà formée, la vapeur condensée se dissipe de nouveau.

Voici enfin un dernier effet de ce genre. Des poutres placées dans un grenier au dessus d'un plafond avaient tellement modifié à distance la surface unie du plafond, que les poussières et les vapeurs de l'appartement, en s'y attachant, dessinaient parfaitement l'image des poutres. Ce fait est très-important, et il suffirait à lui seul pour renverser de fond en comble les idées théoriques de M. Moser.

CINQUIÈME NOTE DE M. MOSER. — *Réponse à MM. Fizeau et Daguerre.* — M. Fizeau disait, dans une première lettre à M. Arago :

« Depuis mon retour, je me suis activement occupé des singuliers phénomènes observés par M. Moser, et j'espère avoir l'honneur de présenter prochainement à l'Académie un travail sur ce sujet. Je me bornerai donc ici à vous parler des résultats généraux auxquels je suis parvenu.

» Les expériences que j'ai faites jusqu'ici ont pour la plupart confirmé les faits énoncés ; mais je dois dire que toutes m'ont conduit à envisager ce sujet sous un autre point de vue que celui de M. Moser.

» Loin de penser qu'il faille admettre de nouvelles radiations s'échappant de tous les corps, même dans une obscurité complète, et soumises dans leur émission à des lois toutes spéciales, je suis convaincu qu'aucune espèce de radiation ne peut être invoquée dans l'explication de ces phénomènes, mais qu'il faut plutôt les rattacher aux faits connus que je vais rappeler.



» 1° La plupart des corps sur lesquels nous opérons ont leur surface revêtue d'une légère couche de matière organique, analogue aux corps gras et volatils, ou au moins susceptible d'être entraînée par la vapeur d'eau.

» 2° Lorsque l'on fait condenser une vapeur sur une surface polie, si les différentes parties de cette surface sont inégalement souillées par des corps étrangers, même en quantité extrêmement petite, la condensation se fait d'une manière visiblement différente sur les différentes parties de cette surface.

» Lors donc que l'on exposera une surface polie et pure au contact ou à une petite distance d'un corps quelconque à surface inégale, il arrivera qu'une partie de la matière organique volatile dont cette dernière surface est revêtue sera condensée par la surface polie en présence de laquelle elle se trouve; et, comme j'ai supposé que le corps présentait des inégalités ou des saillies et des creux, c'est-à-dire que ses différents points étaient inégalement distants de la surface polie, il en résultera un transport inégal de la matière organique sur les différents points de cette surface; aux points correspondants aux saillies du corps, la surface polie aura reçu plus, et aux points correspondants aux creux, elle aura reçu moins; il en résultera donc une sorte d'image, mais ordinairement invisible. Si l'on fait condenser alors une vapeur sur cette surface polie, on voit qu'elle se trouve dans les conditions que je rappelais tout à l'heure, et que la condensation va se faire d'une manière visiblement différente sur les différents points, c'est-à-dire que l'image invisible deviendra visible. »

Dans une seconde lettre écrite en février 1843, M. Fizeau énonçait encore les propositions suivantes :

« 1° La propriété de former des images sur une surface polie n'est pas permanente dans les corps; mais si, avec un même corps, on cherche à obtenir successivement un grand nombre d'images, on voit que son pouvoir s'affaiblit peu à peu, et devient presque nul après un certain nombre d'épreuves, nombre variable avec la nature, mais surtout avec la texture des corps : les corps compactes comme les métaux perdent rapidement cette propriété, les corps poreux la conservant, au contraire, d'une manière remarquable.

» 2° Lorsque la propriété de produire des images s'est perdue ou

affaiblie dans un corps, on la lui rend instantanément en promenant les doigts à sa surface, ou en frottant cette même surface avec les poils d'un animal vivant, qui, comme on le sait, sont toujours imprégnés de matières organiques connues sous le nom de suint.

» 3° Lorsqu'on élève la température du corps formant image, celle de la surface polie restant la même, l'image se forme dans un temps très-court.

» 4° Lorsqu'une surface polie a reçu l'image d'un corps, cette même surface, placée très-près d'une seconde surface polie, est susceptible de former à son tour une image que l'on peut appeler *secondaire*, et qui elle-même pourrait former des images tertiaires, si la netteté de l'impression ne diminuait pas très-rapidement par ces transports successifs.

» 5° En interposant une lame très-mince de mica entre les corps formant image et la surface polie, j'ai constamment trouvé que l'action était nulle. Cependant, dans certaines circonstances, on obtient ainsi des images qu'il est important de ne pas confondre avec celles qu'aurait produites le corps lui-même; c'est le cas dans lequel une même lame de mica, servant à deux expériences consécutives, sera placée, dans la seconde expérience, dans une position inverse de celle qu'elle aura occupée dans la première; alors la surface de mica qui, pendant la première expérience, aura été en contact avec le corps formant image et aura ainsi été impressionnée, se trouvera en contact avec la surface polie pendant la seconde, et devra dès lors donner lieu à une image *secondaire*. Cette image pourra toujours être distinguée de l'image directe, en ce que celle-ci est évidemment une représentation symétrique de la surface du corps, tandis que l'image secondaire étant symétrique par rapport à la précédente, se trouve une représentation identique du corps.

» 6° Enfin, les diverses expériences relatives à ces images ont absolument les mêmes résultats, soit que l'on opère sous l'influence de la lumière, soit que l'on opère dans une obscurité complète. »

M. Daguerre aussi, dans une note insérée aux comptes rendus de l'Académie, avait attribué la formation des images de Moser à l'intervention d'une certaine substance qu'il désignait sous le nom de limon atmosphérique.

L'eau, disait-il, qui se condense, même à la plus légère différence

de température entre la surface d'un corps et l'air environnant, contient en dissolution ou en suspension une matière non volatile, qu'on pourrait appeler limon atmosphérique ; et dès que l'équilibre de température s'établit entre l'air et la surface du corps, la vapeur humide qui s'y était condensée se volatilise, et, y déposant le limon qu'elle contient, va se saturer dans l'air d'une nouvelle quantité de cette substance impure. Le procédé le plus efficace pour éliminer ce limon consiste à couvrir la plaque, après qu'elle a été polie, d'une couche d'eau très-pure, à la chauffer très-fortement avec une lampe à esprit de vin, comme on fait dans l'opération du fixage, et à verser ensuite cette couche d'eau, de manière que sa partie supérieure où surnage le limon qu'elle a soulevé ne touche pas la plaque. On ne doit soumettre ainsi la plaque à l'action de l'eau bouillante, qu'au moment de l'ioder : pendant qu'elle est encore chaude, on la pose de suite dans la boîte à iode, et sans la laisser refroidir on la soumet à la vapeur des substances accélératrices.

M. Daguerre disait encore : « Ce limon atmosphérique, qui est le fléau des images photogéniques, est, au contraire, l'âme des images qu'on obtient au contact ou à très-courte distance. Pour s'en convaincre, on n'a qu'à décaper les deux corps qu'on veut mettre en contact, avec l'eau bouillante, comme nous venons de l'indiquer, et à les tenir tous deux à la même température que l'air ; on n'aura alors aucune impression, ce qui prouve évidemment que ces images n'ont aucun rapport avec la radiation qui donne les images photogéniques. Du reste, ajoutait-il, j'avais remarqué depuis fort longtemps la différence qui existe entre ces images, puisque je l'ai signalée dans la note que j'ai ajoutée au procédé de M. Niepce, page 44 de ma brochure publiée en 1839. »

Cette dernière assertion nous a fort intrigué ; il nous répugnait vivement de croire que M. Daguerre eût depuis longtemps découvert les images de Moser ; nous nous sommes donc mis en campagne pour retrouver cette bienheureuse brochure de 1839. Après trois jours de recherches, nous avons enfin réussi, et exploré avec la plus vive impatience la fameuse page 44 : or, voici ce que nous avons trouvé en note ; *Les observations que l'on peut faire par ces essais ne peuvent pas s'appliquer aux résultats que l'on obtient dans la chambre noire. Les effets de la lumière traversant une gravure, surtout ver-*

nisée, mise en contact avec le corps sensible, diffèrent de ceux qui donnent lieu à la reproduction de l'image dans la chambre obscure.

Quoi ! M. Daguerre a osé dire, en parlant de ces lignes, qu'il y a signalé la différence entre les images photographiques et les images de Moser : c'est vraiment, pour ne rien dire de plus, un excès d'audace tout-à-fait incroyable. Comparer le dessin produit par l'action de la lumière à travers une gravure rendue transparente au moyen d'un vernis, à celle qu'imprime un corps quelconque sur la plaque avec laquelle il est mis en contact ou dont il n'est séparé que par une petite distance, dans l'obscurité ; cela dépasse toute permission. Après avoir refoulé au second plan l'incomparable Niepce, et s'être enrichi de ses glorieuses dépouilles, M. Daguerre voulait-il donc aussi disputer à M. Moser, qu'il n'a pas même daigné nommer, la gloire de sa brillante découverte ? On nous pardonnera cette expression trop vive d'un sentiment de justice et de probité littéraire qui a éclaté malgré nous.

M. Moser n'a pas voulu laisser sans réponse les objections de MM. Fizeau et Daguerre ; il les réfute, et, nous devons le dire, avec succès, dans une note insérée dans les *Annales de Poggendorff*. Le triomphe, du reste, ne pouvait pas être douteux ; les deux physiciens français n'avaient entrevu que la moitié de la vérité ; en s'arrêtant à l'idée de limon organique ou atmosphérique, ils restaient dans le vague. Si, pénétrant plus avant, ils avaient deviné le rôle des atmosphères gazeuses, M. Moser, qui s'est bien gardé de relever le gant qui lui était jeté par M. Waidele, n'aurait pas trouvé un nouvel appui dans les faits même qu'il lui opposait. « Les notes de MM. Fizeau et Daguerre, disait-il, prouvent surabondamment qu'ils connaissent très-imparfaitement les phénomènes que j'ai décrits : ils les ont à peine entrevus à travers des extraits informes et incomplets de mes mémoires. Que M. Fizeau purifie la plaque et le corps qui doit former sur elle son image avec tout le soin imaginable ; mieux il aura réussi à les défendre de tout limon organique, et plus l'image sera parfaite, au contact, à distance, à travers une couche d'eau, d'huile, etc. J'ai fait bouillir, comme M. Daguerre, la plaque et le corps, le limon atmosphérique avait certainement disparu, et j'ai obtenu cependant d'aussi belles images que si je n'avais pas soumis à l'ébullition les corps sur lesquels j'opérais. L'ébullition de la plaque

ne joue pas le rôle si important, que M. Daguerre lui assigne, d'accroître la sensibilité. Si, en effet, quand la plaque qui a bouilli est encore chaude, on la soumet à la vapeur du chlorure d'iode, au lieu d'augmenter, sa sensibilité a réellement diminué, et cependant le limon atmosphérique a été enlevé.

Après avoir réfuté ses adversaires, M. Moser, dans la seconde partie de la note que nous analysons, revient sur quelques propriétés remarquables des vapeurs.

Les vapeurs d'iode, de chlore, de brome, n'ont pas seulement la propriété de rendre les plaques d'argent plus sensibles à l'action de la lumière; elles jouissent d'une faculté plus extraordinaire, celle de détruire peu à peu l'action déjà produite par la lumière sur une plaque préparée à l'ordinaire, et de la ramener à son état primitif, ou du moins à une phase antérieure. M. Moser s'est assuré, par de longues séries d'expériences, de la vérité d'une proposition plus générale encore : toute substance, vapeur ou gaz, qui, en se combinant avec l'argent, lui communique une plus grande sensibilité pour la lumière, possède aussi la propriété de détruire peu à peu l'effet déjà produit et réciproquement. L'oxigène, par exemple, est dans ce cas : l'oxide d'argent est très-sensible à la lumière, et l'image produite sur une plaque sensible s'efface peu à peu par son contact avec l'oxigène : il en est encore de même du gaz fluorhydrique. Il faut observer seulement que la propriété de ramener la plaque à une phase antérieure est plus ou moins intense : si le temps d'exposition a dépassé quatre ou cinq fois celui qui était nécessaire pour donner une image ordinaire, l'oxigène et l'acide fluorhydrique ne ramèneront plus la plaque, tandis que l'iode produira cet effet, même après une exposition d'un jour entier.

La vaporisation de l'eau produit un effet analogue : on laisse la plaque iodée dans la chambre obscure cinq ou six fois le temps nécessaire, on verse sur elle de l'eau chaude qu'on laisse s'écouler, et quand elle est sèche on l'expose à l'action des vapeurs du mercure : l'image obtenue est précisément ce qu'elle aurait été si la plaque était restée dans la chambre obscure pendant le temps ordinaire. On devait en conclure, en vertu de la proposition générale ci-dessus énoncée, que la vaporisation de l'eau rendrait la plaque plus sensible à l'action de la lumière, et c'est ce que prouve, en effet, l'expérience

de M. Daguerre si mal interprétée par lui. Le simple contact de l'eau produit d'ailleurs le même effet que la vaporisation.

M. Moser énonce encore un autre théorème digne d'attention : si deux vapeurs ou deux gaz, A et B, possédant séparément la faculté de rendre l'argent plus sensible à l'action de la lumière, agissent sur lui l'un après l'autre, la sensibilité définitive sera toujours différente de ce qu'elle aurait été, si une seule des substances A ou B avait exercé son action. Il peut se présenter trois cas : 1° la sensibilité de la plaque peut être accrue par l'emploi successif de A et B, dans quelque ordre qu'on les fasse agir ; le chlore et l'iode sont dans ce cas : 2° la sensibilité de la plaque peut être accrue, mais suivant l'ordre dans lequel les substances agissent ; si, par exemple, on fait agir d'abord l'iode, puis le chlorure d'iode, la plaque sera un peu plus sensible que si l'on avait employé le chlorure d'iode tout seul, et *beaucoup* plus sensible que si l'on n'avait fait usage que des vapeurs d'iode ; si, au contraire, le chlorure d'iode agit avant l'iode, la sensibilité est moindre que si le chlorure d'iode avait seul agi : 3° la sensibilité de la plaque peut être diminuée par l'intervention de la vapeur ou du gaz B, qu'on l'applique avant ou après la substance A ; les vapeurs de chlore, appliquées avant ou après le chlorure d'iode, rendent la plaque moins sensible.

SIXIÈME NOTE. — *Expérience tendant à prouver que la vapeur de mercure renferme de la lumière latente.* — On iodure une plaque d'argent au point de lui donner une belle teinte jaune, et on la chauffe en la plaçant sur une lampe à esprit de vin, pendant à peu près une minute ; l'iodure d'iode devient d'abord plus sombre, et passe plus tard à une couleur blanc de lait. La nouvelle substance blanche est très-impressionnable à la lumière, et toutes les couleurs du spectre lui communiquent une teinte gris d'acier. Si, après qu'elle a été refroidie, on la place sous un écran découpé, séparé d'elle par une distance d'une ligne environ, et qu'on la porte dans la boîte à mercure chauffée à 60°, puis ramenée à la température de 30°, on trouvera que, partout où la vapeur de mercure a agi, la plaque est devenue gris d'acier, et qu'on a obtenu une image de l'écran absolument semblable à celle qu'aurait donné l'action de la lumière ordinaire. La vapeur de mercure condensée est cependant blanche, et il faut admettre, ce semble, que la couleur gris d'acier

est due à l'action prédominante de la lumière latente. La chaleur ne peut ici jouer aucun rôle, car elle est impuissante à communiquer à la substance blanche la nuance grise d'acier. Pour cette même substance aussi, il n'existe pas de rayons chimiques, car tous les rayons du spectre le colorent également.

SEPTIÈME NOTE. — *Réponse à M. Edmond Becquerel.* — Dans son mémoire *sur les effets produits sur les corps par les rayons solaires*, M. Becquerel avait dit : « un faisceau de rayons solaires, contenant une infinité de rayons de réfrangibilités diverses, on doit nécessairement étudier sur chaque substance l'action de ces différents rayons ; c'est-à-dire du spectre solaire. Je ne reviendrai sur ce sujet que parce que quelques physiciens, et particulièrement M. Moser, ayant négligé l'étude du spectre et des substances qui changent chimiquement d'état à la lumière, et, s'étant borné à examiner l'action des verres colorés, a voulu généraliser les résultats obtenus à l'aide de ces écrans, de sorte qu'il est arrivé à des conclusions inexactes, comme je le démontrerai dans le cours de ce mémoire. » Ce mot, *conclusions inexactes*, indigne d'autant plus M. Moser, qu'il a vainement cherché dans le mémoire la démonstration promise. Partout, au contraire, à son grand étonnement, il a vu que M. Edmond Becquerel avait observé les mêmes faits que lui. M. Moser avait dit que les rayons transmis par des verres rouges, peuvent, quoique difficilement, commencer l'action sur l'iodure d'argent : M. Becquerel opère tour à tour et avec les rayons rouges du spectre, et avec divers milieux colorés en rouge, et il arrive exactement au même résultat que M. Moser ; l'iodure d'argent était coloré après un temps suffisamment long : M. Moser en concluait que la lumière rouge était à sa manière excitatrice. Désireux de maintenir la distinction aujourd'hui insoutenable de rayons excitateurs et de rayons continuateurs, M. Becquerel veut : 1° que l'impression produite à travers les milieux colorés, soit due à la présence d'autres rayons qui accompagnent la lumière rouge, transmise non-homogène ; 2° que l'impression manifeste de la portion rouge, prise dans le spectre lui-même, soit attribuée à ce fait, que le spectre, même le mieux épuré que l'on puisse avoir, est toujours accompagné d'un peu de lumière diffuse. MM. Moser et Becquerel ont donc observé réellement le même fait ; ils diffèrent seulement dans l'interprétation ; or, dit M. Moser, il y a

loin d'une interprétation différente à des conclusions inexactes, et M. Becquerel n'avait pas le droit de s'exprimer si durement à mon égard : et cela, d'autant moins, qu'en attaquant ma méthode d'expérimentation, M. Becquerel prend le soin très-singulier de renverser de fond en comble la sienne. Il avait à peine dit que les expériences faites avec les verres colorés dans le but de reconnaître les réfrangibilités des rayons actifs n'ont aucune valeur, qu'il ajoute : « En agissant avec les rayons du spectre, on a des résultats plus exacts; mais, QUELQUEFOIS, il se mêle à eux un peu de lumière diffuse, ce qui complique les effets produits, surtout, si l'exposition de la matière sensible est de longue durée. » Quand il se servait de cette expression par trop radoucie, QUELQUEFOIS, M. Becquerel, par une de ses inadvertances trop peu rares dans ses mémoires, oubliait qu'il avait dit, quelques pages auparavant : LE SPECTRE, MÊME LE MIEUX ÉPURÉ, est TOUJOURS ACCOMPAGNÉ D'UN PEU DE LUMIÈRE DIFFUSE. Si, partageant le mécontentement de M. Moser, nous nous montrons un peu sévère envers M. Edmond Becquerel, dont, plus que tout autre, nous apprécions le talent et l'ardeur, c'est qu'il lui arrive trop souvent de traiter cavalièrement les physiciens, même célèbres, qui étudient les mêmes sujets que lui. La critique qu'il fait, par exemple, du bon mémoire de M. Malagutti, est d'une subtilité excessive : lui qui ne tient pas assez compte de l'action réelle exercée par la matière du prisme et la présence inévitable de la lumière diffuse ; il s'appesantit longuement sur la prétendue influence d'un déplacement de l'image, et de réflexions secondaires tout à-fait insensibles ; il oublie que l'actinomètre électro-chimique n'est pas un instrument comparable, etc., etc. Après avoir tout pesé mûrement nous ne craignons pas de dire que les résultats obtenus par M. Malagutti nous inspirent une entière confiance ; et que nous préférons sa méthode d'expérimentation, quoique M. Becquerel dise imperturbablement, en parlant de la sienne, quelle est la seule manière d'arriver à des résultats exacts. N'oublions pas, d'ailleurs, que le mémoire de M. Malagutti a précédé de quatre années celui de M. Becquerel, et qu'il constatait un fait important, celui du pouvoir accélérateur de l'eau distillée.

HUITIÈME NOTE. — *De l'action des rayons colorés sur l'iodure d'argent.* — Bien avant M. E. Becquerel, sir William Herschell avait reproché à M. Moser l'emploi des verres colorés ; ces verres, disait-

il, peuvent donner lieu à tant de méprises et d'erreurs, qu'il faut absolument se résoudre à n'expérimenter qu'avec le spectre lui-même. M. Moser s'est d'autant plus ému de ces reproches, que l'emploi des verres colorés a été la base fondamentale de ses recherches sur la lumière; et il s'efforce de les repousser avec une ardeur toute nouvelle, en démontrant les trois propositions suivantes : 1° Les verres colorés ne m'ont induit en aucune erreur, et je les ai employés dans des conditions telles, que l'erreur, en effet, n'était pas possible; 2° Les couleurs prismatiques du spectre ne donnent aucun résultat qui combatte ceux obtenus par les verres colorés : 3° La manière d'employer le spectre de M. Herschell ne peut en aucune manière être utilisée dans mes expériences.

I. Le théorème fondamental, démontré à l'aide des verres colorés, est celui-ci : tous les rayons colorés exercent substantiellement la même action sur l'iodure d'argent; ils diffèrent seulement par le temps plus ou moins long nécessaire à la production d'un même effet. M. Herschell n'a pas sans doute l'intention de contester la vérité de ce théorème; il attaque seulement le mode de démonstration : le verre rouge, employé par M. Moser, ne transmettait pas une lumière rouge, simple et homogène, il n'excluait pas absolument les rayons plus réfrangibles et plus actifs : on ne pouvait donc pas prétendre arriver à une conclusion certaine. Oui, dit M. Moser, si dans mes expériences je ne m'étais pas arrangé de telle sorte, que l'effet observé par moi ne pouvant pas être produit par les rayons plus réfrangibles, je devais l'attribuer uniquement aux rayons rouges, absolument comme s'ils avaient été parfaitement homogènes. Rappelons, en effet, l'expérience capitale par laquelle il est resté prouvé que l'action des divers rayons différait essentiellement par la seule durée : on laissait la plaque iodurée dans la chambre obscure le cinquantième de temps *t* nécessaire à la production d'une image daguerrienne ordinaire; puis, on l'exposait sous un verre rouge à l'action de la lumière solaire pendant quelques minutes; aussitôt il se formait une image négative. On pouvait évidemment regarder ici les rayons rouges comme homogènes, puisque, loin de produire le même effet, loin de faire ressortir une image, tous les autres rayons du spectre auraient nivelé la plaque ou détruit l'impression reçue dans la chambre obscure. Si le temps de l'exposition dans cette même

chambre obscure devenait un vingtième ou un dixième de *t*, les rayons jaunes et verts à leur tour ne nivellaient plus, ils agissaient comme les rayons rouges, ils produisaient une image négative; tandis que les rayons bleus et violets continuaient encore à niveler, même lorsque la plaque était restée dans la chambre obscure dix fois, vingt fois le temps *t*, même quand la simple exposition trop prolongée avait donnée elle-même une image négative. N'est-il pas évident, qu'employés de cette manière, les verres colorés ne peuvent pas induire en erreur.

M. Moser avait affirmé qu'une image négative, formée dans la chambre obscure, se changeait en image positive sous l'influence des verres jaunes et verts; que, sous cette même action, l'iodure noirci redevenait jaune, tandis que l'iode jaune se noircissait. En parlant de ce résultat, M. Herschel avait dit qu'il était parfaitement inintelligible pour tout homme qui aurait étudié dans le prisme la propriété des rayons colorés. Or, M. Moser répond que l'incompréhensible atteint non les expériences qui sont parfaitement exactes, mais la nature elle-même qui a bien réellement produit les effets ci-dessus énoncés. Cette transformation d'images négatives en images positives, que M. Moser ne vit d'abord s'effectuer que sous les couleurs jaune et verte, est produite, comme il l'a prouvé plus tard, par tous les autres rayons; elle est donc un phénomène commun; le temps seul varie d'un rayon à l'autre et dans l'ordre des réfrangibilités. Il est impossible qu'avec sa patience et sa bonne volonté bien connues, M. Herschel n'arrive pas à reproduire les mêmes phénomènes avec les couleurs empruntées directement au spectre solaire. M. Moser, pour rassurer pleinement M. Herschel au sujet des images positives qui lui ont valu de si durs reproches, ajoute qu'en opérant d'une manière convenable on fait succéder par le procédé indiqué aux premières images négatives des images positives, si parfaites, si semblables aux plus belles épreuves daguerriennes, que si elles s'étaient présentées d'abord aux inventeurs de la daguerréotypie, ils se seraient arrêtés en chemin; de telle sorte que la magnifique découverte des merveilleuses propriétés de la vapeur de mercure leur aurait probablement échappé.

II. Après cette première réponse, M. Moser opère à son tour avec le spectre solaire, par tous les moyens en son pouvoir, mais il reste

bientôt convaincu de l'impossibilité d'arriver à quelque nouveau résultat, parce que la lumière ainsi obtenue, loin d'être aussi homogène que celle donnée par les verres colorés parfaitement choisis, contient un excès de lumière blanche, ou de lumière violette. Il a été seulement assez heureux pour confirmer ainsi pleinement les résultats auxquels l'avait conduit l'emploi des verres colorés, et résoudre l'objection à laquelle l'autorité imposante de sir Herschel donnait une force nouvelle.

III. M. Moser enfin s'efforce de démontrer que, loin de pouvoir éclaircir aucune difficulté, la méthode proposée par M. *Herschel*, et qui consiste à faire agir d'abord le spectre sur la plaque iodurée, puis à soumettre cette plaque à l'action des vapeurs de mercure, n'est en aucune manière utile quand il s'agit d'étudier les actions relatives des divers rayons. Car, 1° des rayons peuvent avoir agi très-inégalement, sans que la couleur primitive de l'iodure d'argent soit sensiblement altérée, sans qu'on puisse apercevoir de différence sensible dans la quantité de vapeurs de mercure précipitées et rendues adhérentes; 2° les vapeurs de mercure possèdent elles-mêmes la propriété de changer la couleur de l'iode, et peuvent ainsi masquer les effets différents produits par les diverses couleurs; 3° l'iodure d'argent est d'abord très-soluble dans les dissolutions d'hyposulfite ou de chlorure de soude; l'action de la lumière le rend ensuite *insoluble*, comme on le remarque déjà dans l'iodure noirci, mais, en continuant son action, la lumière rend à l'iodure sa solubilité; et d'ailleurs les différens degrés de solubilité ont une influence très-grande sur l'aspect que l'action des vapeurs de mercure communique à la plaque: il est donc impossible que ces particularités importantes ne contribuent pas puissamment à masquer à leur tour les différences d'actions des rayons diversement colorés; 4° enfin, l'action des vapeurs de mercure est très-inégale, et dépend de plusieurs causes extérieures qu'il est souvent difficile d'apprécier. Il est donc vrai, et sous ce rapport nous sommes de l'avis de M. Moser, que le mode d'expérimentation de M. Herschel, très-complexe en lui-même, très-difficile à analyser, ne mérite pas la confiance absolue qu'il lui donne. Mais aussi, quoi qu'en dise M. Moser, nous sommes complètement de l'avis du physicien anglais, lorsqu'il condamne et repousse la pensée et la dénomination de *lumière latente ou obscure*, enten-

dues comme l'avait fait M. Moser; on peut certainement concevoir qu'il existe, en effet, des radiations lumineuses qui ne sont pas sensibles à l'œil, et qui se manifestent seulement, soit par une élévation de température, soit par des effets chimiques, soit par l'excitation de la phosphorescence; si M. Moser n'a pas voulu dire autre chose, s'il admet simplement que ces rayons obscurs analogues à ceux découverts par Ritter diffèrent seulement des autres par une plus grande réfrangibilité, on aurait tort d'essayer de le combattre. Mais ce n'est pas là certainement ce qu'il a voulu dans ses premiers mémoires; et la lumière qu'il disait mise en liberté dans l'acte de condensation des vapeurs, par exemple, ne pouvait en aucune manière être identifiée avec les radiations dont nous venons de parler. Voilà pourquoi on l'a combattu, et il n'est pas douteux aujourd'hui qu'il s'était totalement trompé dans sa manière d'expliquer la formation des curieuses images qui immortaliseront son nom.

M. Moser a publié une dernière note sous ce titre : *sur les prétendues images de chaleur*, mais nous ne pourrons l'analyser que quand nous aurons parlé des recherches de MM. Knorr et Hunt.

En 1844 aussi, il a inséré, dans l'annuaire de Schumacher, sous ce titre, *Ueber das licht*, une très-longue analyse de ses recherches, mais dans laquelle nous n'avons trouvé ni aucune expérience, ni aucune vue théorique nouvelles.

Il ne nous reste, pour rendre complète l'étude que nous avions à faire des images de Moser, qu'à reproduire deux notes dignes d'intérêt. La première extraite du *Giornale Toscano di science*, a pour but de montrer que les phénomènes découverts par M. Moser peuvent très-bien s'expliquer par les principes connus, et vient ainsi en aide à la théorie de M. Waidele: la seconde constate quelques faits curieux, et qu'il importe de sauver de l'oubli.

Note sur les expériences de Moser. — Les expériences de Moser sont de nature à exciter la curiosité et l'intérêt des savants par leur singularité et par l'espèce de mystère dans lequel est encore enveloppée leur explication.

Nous pensons, toutefois, qu'avant de recourir à des forces nouvelles et occultes, ou à des propriétés nouvelles de forces généralement admises, il convient de tenter de s'en rendre compte en les expliquant au moyen des forces dont nous connaissons déjà les lois et

la nature. Les expériences de Moser nous paraissent en quelque façon liées à celles que Prévost, Carradori et Lehot ont faites il y a déjà plusieurs années sur l'adhésion entre les gouttes liquides et les surfaces polies des solides, sujet qui a été dernièrement l'objet des recherches de Dutrochet. L'ignorance où nous sommes encore des lois qui régissent ces phénomènes, peut seule faire comprendre comment un observateur aussi habile que M. Dutrochet a pu s'être laissé conduire à imaginer une nouvelle force qu'il appelle *épipolique*, ou force de superficie.

Voici une des conclusions principales auxquelles Moser a été conduit par ses expériences :

« La condensation des vapeurs sur les plaques produit une modification sur leur superficie, qui est indiquée par une différence dans la condensation successive des vapeurs qui y adhèrent, ou qui les altèrent chimiquement. »

On peut faire la plus simple des expériences qui conduisent à ce résultat, en soufflant sur une lame de Daguerre ou sur une plaque d'acier ou de verre, ou sur la surface d'une couche de mercure après avoir recouvert cette surface avec un diaphragme découpé. De cette façon, la vapeur se condense sur quelques points et non sur d'autres; ces derniers sont évidemment les portions de la surface recouvertes par le diaphragme. Lorsqu'on enlève celui-ci, tout disparaît au bout de quelques secondes; mais il suffit de souffler de nouveau pour voir reparaître une figure qui représente le diaphragme avec ses découpures. Si on remarque la manière dont la vapeur condensée disparaît des divers points de la surface, on verra que les points non couverts du diaphragme, et où la vapeur s'était condensée d'abord, sont ceux d'où elle disparaît le plus tôt.

On verra aussi, en examinant la plaque sur laquelle on a soufflé une seconde fois, que les portions qui avaient été couvertes par le diaphragme condensent une couche de vapeur plus opaque ou en apparence plus épaisse que celle qui recouvre les autres portions sur lesquelles la vapeur s'était condensée dans la première expérience. Il ne semble pas difficile d'expliquer ce fait par les principes généraux de l'adhésion. Une goutte d'eau posée sur une surface de verre ou d'une autre substance, quelque polie qu'on la suppose, conserve toujours une forme plus ou moins globuleuse, suivant la masse de la

goutte et la propreté de la surface elle-même. Dutrochet a prouvé récemment que pour qu'une goutte d'eau s'étende en couche unie sur une plaque de verre, il faut donner à cette plaque une surface fraîche qui n'ait pas encore subi le contact de l'air atmosphérique. Sur toute autre surface polie, la goutte reste globuleuse ; et si on examine à la loupe la couche de vapeur condensée, qu'on obtient en soufflant sur une surface polie, on voit que cette couche se compose d'une quantité de globules infiniment petits, qui ne diffèrent que par leur dimension des globules d'eau qu'on obtient, en laissant tomber ce liquide sur une surface recouverte de poussière ou d'huile. Il est naturel d'admettre que lorsque quelques portions d'une surface ont été recouvertes de ces globules qui forment, par leur réunion, la vapeur condensée, elles ont conservé et continuent à conserver pendant longtemps une mince couche d'humidité, une couche de globules plus petits que ceux qui avaient été formés au commencement de la condensation. Il n'y a pas de physicien qui ignore la tenacité avec laquelle ces couches d'eau, ou plutôt ces *voiles* d'humidité, adhèrent à la surface des corps solides, et combien il est difficile de les enlever entièrement, même à l'aide de la chaleur.

Si on présente à cette surface, lorsqu'elle est dans l'état que nous venons de décrire une nouvelle vapeur à condenser, les points qui ont conservé un voile humide plus prononcé exercent sur les globules de la nouvelle vapeur qui se condense, une force d'adhésion qui se manifestera par des effets différents de ceux qui auront lieu sur les autres points. Là où la couche humide sera plus prononcée, l'adhésion aura lieu entre deux couches aqueuses, ou tout au moins entre une couche aqueuse et des points plus recouverts d'eau que ne le sont les autres ; l'état globuleux y sera donc moins développé, et le liquide aura une tendance à former une couche unie plutôt que des globules : il en résultera une transparence plus grande sur ces parties ; et par analogie avec la propriété que possède l'eau, quand, sous forme globuleuse, elle est en contact avec des métaux chauds, une évaporation plus prompte sur les points où les globules sont moins bien formés.

Rappelons une autre expérience faite par M. Moser, et très-facile à reproduire. On prend une médaille, une plaque gravée ou une empreinte de cachet, et on la ternit avec l'haleine ; puis, tandis que



cette surface est ainsi couverte d'une couche de vapeur condensée, on la pose sur une plaque de Daguerre, et on l'y laisse pendant quelques instants ; on l'enlève ensuite et on trouve dessinée sur la plaque, par la vapeur qui s'y est condensée inégalement, l'empreinte de la médaille, de la gravure et du cachet.

Si on avait couvert l'objet soumis à l'expérience d'une couche de vapeurs de mercure ou d'iode, au lieu de le ternir avec l'haleine, on aurait obtenu le même résultat. Dans tous les cas dans lesquels le dessin est produit, la vapeur ne se dépose pas sur les portions en creux, mais cette différence disparaît si on laisse les deux surfaces longtemps en contact. Il semble naturel d'admettre que les points les plus rapprochés sont ceux sur lesquels la condensation de la vapeur s'opère d'abord ; lorsqu'on suspend une feuille d'or dans un vase au fond duquel se trouve du mercure, la feuille commence à blanchir dans sa partie inférieure, qui est plus rapprochée de la surface du mercure : et, une fois qu'une image s'est formée sur une surface par la condensation inégale de la vapeur, on comprend, d'après les principes déjà exposés, comment elle est rendue visible par la condensation d'une vapeur nouvelle.

Si on met les médailles, etc., en contact avec la plaque, après l'avoir chauffée au lieu de la couvrir de vapeur, le même phénomène a lieu, c'est-à-dire que les images reparaissent. On peut encore dans ce cas admettre qu'en chauffant les médailles, etc., on a forcé le voile de vapeur qui la recouvrait à disparaître : c'est le même phénomène qui doit avoir lieu lorsqu'une plaque de métal ou de verre est exposée à l'action directe du rayon solaire, étant couverte d'un diaphragme découpé, qui a émis de la vapeur dont la condensation s'est opérée ensuite sur les points de ce diaphragme en contact avec la plaque. Cela admis, les résultats qu'on a obtenus rentrent nécessairement dans les cas cités. Cette explication peut être rendue plus complète au moyen d'une expérience facile à exécuter, et qui a été faite dans notre cabinet de physique. Lorsqu'on opère dans le vide, et après y avoir laissé se refroidir les médailles et autres objets employés dans l'expérience, les images par contact, qui devraient se manifester avec la condensation successive des vapeurs, ne sont pas produites.

Si on admet encore (ce qui me semble s'accorder avec nos con-

naissances sur ce point) que toutes les surfaces des corps exposés à l'atmosphère sont couvertes d'un voile d'humidité, que ce voile doit continuellement augmenter ou diminuer en passant d'une surface à une autre, qu'on peut supposer que même les corps les plus solides émettent des vapeurs qui, après un long espace de temps peuvent produire ce que produisent rapidement leurs surfaces quand elles sont recouvertes de substances facilement évaporables, on ne sera pas contraint de recourir à des forces nouvelles, ni même aux rayons d'une lumière latente et invisible pour expliquer les ingénieuses expériences de Moser. Nous sommes loin d'avoir prétendu en donner une explication complète ; nous nous sommes seulement proposé de montrer qu'on pourrait les expliquer, tout en respectant le principe fondamental des sciences expérimentales : *Causas rerum naturalium non plures admitti debere, quam quæ et veræ sint et earum phænomenis explicandis sufficiant.*

NOTE SUR QUELQUES PROPRIÉTÉS DES PLAQUES GALVANIQUES DE CUIVRE OBTENUES AU MOYEN DES IMAGES DAGUERRIENNES, par M. F. STREHLKE.

On sait qu'on peut obtenir une empreinte galvanoplastique en faisant déposer par le courant une couche de cuivre sur la plaque d'argent d'une image de Daguerre. Les places blanches de l'image daguerrienne déterminent sur la plaque de cuivre une couleur de chair claire et n'ont qu'un poli incomplet, tandis que les parties obscures sont bien polies. On peut, en employant les procédés de polissage très-parfaits, faire disparaître sur la plaque de cuivre toute trace visible de l'image, et donner à cette plaque un poli extrêmement beau. L'image est cependant empreinte jusqu'à une certaine profondeur dans la plaque de cuivre qu'on a obtenue par la galvanoplastie, et on peut la faire reparaître, 1° en plongeant la plaque de cuivre dans les vapeurs de mercure ; 2° en la chauffant promptement jusqu'à ce que sa surface se ternisse ; 3° en la recouvrant d'une légère couche d'acide nitrique ; 4° en se servant de la même plaque de cuivre comme électrode négatif.

En plaçant la plaque de cuivre bien polie dans la boîte à mercure de Daguerre, et en chauffant le mercure jusqu'à 60° R., on voit l'image de la plaque de cuivre qui avait disparu sous l'action du

polissage, reparaître dans toutes ses parties avec le plus grand détail et la plus grande netteté, comme dans l'image même de Daguerre. On peut, au moyen du polissage, enlever plusieurs fois l'image produite par les vapeurs de mercure sur la plaque galvanique de cuivre; mais chaque fois qu'elle reparaît sous l'action des vapeurs de mercure, elle se montre de plus en plus faible jusqu'à ce qu'elle ne paraisse plus. Une empreinte galvanoplastique d'un bouton irisé ne présente point les mêmes propriétés, car elle se recouvre uniformément de mercure, et il ne paraît pas que les différences d'épaisseur dans les différentes parties de la même plaque de cuivre exercent aucune influence sur la manière dont les vapeurs se condensent; cette condensation s'opère également d'une manière uniforme sur des pièces de monnaie de cuivre dont on a usé l'empreinte par le frottement.

L'auteur raconte que dans le mois de septembre, après avoir formé par la galvanoplastie une plaque de cuivre, il l'avait oubliée parmi d'autres : il ne l'avait retirée qu'au mois de mai suivant, il l'avait polie avec le plus grand soin, l'avait exposée aux vapeurs d'iode, et l'avait mise dans la chambre obscure, afin d'y déterminer directement une image daguerrienne. L'action des vapeurs de mercure ne fit paraître que faiblement cette dernière image; mais l'autre image qui avait été enlevée l'année précédente par le polissage, reparut avec la plus grande netteté dans toutes ses parties.

Pour faire reparaître par la chaleur l'image devenue invisible de la plaque de cuivre galvanique, on place celle-ci sur une autre plaque également de cuivre : on chauffe cette dernière, ce qui élève également la température de la première, jusqu'à ce que la surface de cuivre galvanique commence à s'altérer, alors l'image se montre dans la couche d'oxide. Elle peut disparaître comme les autres par l'action du polissage et reparaître de nouveau par l'action de la chaleur : on peut même souvent rendre sensibles par la chaleur les images qui ne peuvent plus reparaître sous l'action des vapeurs de mercure.

Pour faire reparaître par l'action de l'acide nitrique l'image devenue invisible sur une plaque de cuivre galvanique bien polie et nettoyée, il faut étendre avec du coton filé une couche d'acide nitrique mêlé avec de l'eau. L'image est d'abord négative, c'est-à-dire

que les parties qui correspondent aux endroits clairs de l'image daguerrienne sont d'un rouge foncé, et les autres de couleur rose clair. Mais dès que, par l'effet de l'action prolongée de l'acide sur le métal, la plaque se recouvre d'une couche verdâtre, couche qu'il faut faire disparaître en frottant à plusieurs reprises avec du coton bien sec, l'image devient positive; le brun clair correspond aux clairs, et le brun foncé aux ombres de l'objet réel. Les images qui sont ainsi reproduites par l'action de l'acide nitrique sont solides, ainsi que celles que la chaleur fait reparaître. Elles peuvent de même disparaître par l'effet d'un fort polissage, et reparaître de nouveau par l'action de l'acide.

L'électricité galvanique peut faire reparaître l'image formée sur le cuivre galvanique; il suffit, pour cela, de se servir de ce cuivre comme pôle négatif dans la solution d'un sel métallique dont le métal se dépose sur le cuivre. Les diverses nuances de clair et d'obscur, dans le métal dont se recouvre la surface de cuivre galvanique, rendent l'image visible. L'auteur n'a encore obtenu ce résultat qu'avec des sels d'or et de cuivre; mais il ne doute pas qu'on ne puisse l'obtenir avec d'autres métaux. Si l'on ne met que pendant quelques minutes la plaque de cuivre sur laquelle se trouve l'image invisible dans un appareil galvano-plastique, en ayant soin de le faire communiquer avec la plaque de cuivre de l'appareil, l'image éteinte reparaît sur le cuivre par parties claires et obscures, et ressemble tout-à-fait à l'image qu'on obtient en opérant pendant quelques minutes un dépôt de cuivre sur une image daguerrienne. Dans l'un et l'autre cas, il ne se forme pas précisément une image en relief; mais ce qui rend l'image sensible, c'est une différence dans l'arrangement des molécules du cuivre galvanique, différence que l'action de la lumière a commencé à produire dans le mercure de l'image daguerrienne. Si l'on continue à opérer le dépôt de cuivre sur la plaque galvanique du même métal, l'image finit par disparaître. Si l'on se borne à polir cette plaque, et qu'on la place dans la boîte à mercure, l'image ne reparaît pas. Mais si l'on chauffe la plaque de cuivre, l'image s'y montre même à travers la couche devenue plus épaisse du cuivre qui a été déposé sous l'influence du courant galvanique.

L'auteur termine en faisant remarquer que le cuivre qu'on obtient par la galvanoplastie est plus propre même que l'argent pour obtenir

les images de Moser et celles que M. Knorr détermine par l'action de la chaleur. Les miroirs concaves de cuivre galvanique qu'on produit en faisant déposer le cuivre sur des miroirs convexes, ont une élasticité très-grande, qui explique la propriété qu'ils ont de produire des effets remarquables lors même qu'ils ont de très-petites dimensions.

Une fois l'élan donné par M. Moser, les savants de tous les pays se sont occupés activement, pendant plusieurs années, des images qui naissent à la surface des corps, quand ils sont soumis à l'action des divers agents naturels, la lumière, la chaleur, l'électricité, le magnétisme, etc., etc. Ces recherches, très-nombreuses, très-compliquées, ont cependant donné naissance à des découvertes intéressantes, que nous ne pouvons pas nous dispenser d'analyser ; nous le ferons aussi rapidement que possible ; puisse-t-on nous pardonner les imperfections de cette trop courte analyse, en tenant compte de l'ennui produit à la lecture de tant de mémoires écrits dans tant de langues diverses, souvent mal dirigés et obscurs. Le courage nous a manqué quelquefois, mais la pensée que nous faisions une œuvre utile, et que nous accomplissions un acte de justice, nous a donné des forces nouvelles.

FIN DE LA SECONDE PARTIE.

TABLE DES MATIÈRES.

Paris. — Imprimerie de Wittersheim, rue Montmorency, 8.